



# UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

## TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Análisis de esfuerzos de una biela de bicicleta mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) con distintos materiales.

Autor/es

PEDRO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

Director/es

MARÍA ÁNGELES MARTÍNEZ CALVO

Facultad

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Departamento

INGENIERÍA MECÁNICA

Curso académico

2017-18



***Análisis de esfuerzos de una biela de bicicleta mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) con distintos materiales.***, de PEDRO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD  
DE LA RIOJA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica**

**CURSO: 2017/2018**

**CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE**

**TÍTULO:**

**Análisis de esfuerzos de una biela de bicicleta mediante el  
Método de Elementos Finitos (MEF) con distintos  
materiales**

**AUTOR:** Pedro Rodríguez Sánchez

**DIRECTOR/ES:** María Angeles Martínez Calvo

**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Mecánica



## RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado se estudia el comportamiento de una biela de bicicleta sometida a esfuerzos, mediante el Método de Elementos Finitos, para distintos materiales. Para ello, se ha realizado una búsqueda de información exhaustiva relacionada con la industria ciclista, en concreto con una de las partes de la bicicleta, la biela. En primer lugar, se explican los componentes y las fuerzas que actúan en una bicicleta de forma general. Más adelante, los materiales más utilizados en este campo. Y, finalmente, la fatiga que estos esfuerzos generan en la pieza dependiendo del material. Con la información y conocimientos adquiridos sobre la materia, se ha creado un modelo virtual del conjunto: pedal, biela y eje de pedalier. Se ha tratado de hacer un modelo lo más acorde a la realidad basándose en los diseños de las grandes marcas del sector. Una vez creado el modelo, se le han practicado análisis estáticos y de fatiga mediante un módulo de Ingeniería Asistida por Ordenador. Estos análisis han sido realizados con tres materiales: acero aleado, aluminio 7075-T6 y titanio Ti-6Al-4V. Finalmente, con los resultados obtenidos, se llega a unas conclusiones y se exponen posibles desarrollos en el futuro.

### **Palabras clave:**

Biela de bicicleta, Método de Elementos Finitos, modelo virtual, Ingeniería Asistida por Ordenador, análisis estático, fatiga, acero aleado, aluminio 7075-T6, titanio Ti-6Al-4V.

## ABSTRACT

In the present Final Degree Work, the behavior of a bicycle crank arm subject to stresses, through the Finite Element Method, for different materials is studied. To do this, an exhaustive search of information has been made related to the cycling industry, specifically with one of the parts of the bicycle, the crank arm. First, the components and forces acting on a bicycle are explained in a general way. Later, the most used materials in this field. And, finally, the fatigue that these efforts generate in the piece depending on the material. With the information and knowledge acquired on the subject, a virtual model of the set has been created: pedal, crank arm and bottom bracket. It has tried to make a model as consistent with reality based on the designs of the major brands in the sector. Once the model has been created, static and fatigue analyzes have been carried out using a Computer Assisted Engineering module. These analyzes have been made with three materials: alloy steel, aluminum 7075-T6 and titanium Ti-6Al-4V. Finally, with the results obtained, conclusions are reached and possible future developments are exposed.

### **Keywords:**

Bicycle crank arm, Finite Element Method, virtual model, Computer Assisted Engineering, static analysis, fatigue, alloy steel, aluminum 7075-T6, titanium Ti-6Al-4V.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
Motivación.....	1
Objetivo.....	1
Documentación .....	1
1. CONCEPTOS INICIALES.....	3
1.1. BIOMECÁNICA DEL CICLISMO .....	3
1.1.1 Historia de la bicicleta.....	3
1.1.2 Anatomía de la bicicleta.....	6
1.1.3 Fuerzas en el pedal, biela y eje pedalier .....	8
1.2 MATERIALES .....	10
1.2.1 Selección de materiales en el diseño de piezas .....	10
1.2.2 Materiales en el ciclismo.....	12
1.3 FUNDAMENTOS DE LA FATIGA .....	17
1.3.1 Rotura fatiga .....	17
1.3.2 Diagramas S-N.....	19
1.3.3 Factores modificativos del límite de fatiga .....	20
1.3.4 Tensiones fluctuantes.....	25
1.3.5 Daño acumulativo .....	27
2 ESTADO DEL ARTE.....	29
2.1 MERCADO.....	29
2.1.1 Bielas Rotor (ALDHU).....	29
2.1.2 Shimano (HOLLOWTECH).....	30
2.1.3 Full Speed Ahead (FSA).....	31
2.2 PATENTES .....	32
2.3 NORMATIVA.....	35
2.3.1 Método de prueba con las bielas a 45° respecto a la horizontal... 35	
2.3.2 Método de prueba con las bielas a 30° respecto a la horizontal... 37	
3 MODELIZACIÓN DEL CONJUNTO CON SOLIDWORKS.....	38
3.1 Diseño biela .....	39
3.2 Diseño eje pedalier.....	40
3.3 Diseño pedal .....	41
3.4 Ensamblaje .....	42

4	ANÁLISIS ESTÁTICO Y DE FATIGA CON SOLIDWORKS SIMULATION	43
4.1	Introducción a Solidworks Simulation	43
4.2	Método de Elementos Finitos	43
4.3	Mallado	44
4.3.1	Malla sólida	44
4.3.2	Malla de vaciado	45
4.3.3	Malla de viga	45
4.3.4	Malla mixta	45
4.4	Análisis estático	46
4.4.1	Sujeciones	46
4.4.2	Cargas	46
4.4.3	Propiedades del material	47
4.4.4	Modelo de mallado	47
4.4.5	Resultados del análisis estático	47
4.5	Análisis de fatiga	48
4.5.1	Definiciones de fatiga	48
4.5.2	Requerimientos para realizar un análisis de fatiga	49
4.5.3	Ingreso de sucesos	49
4.5.4	Curvas S-N	51
4.5.5	Propiedades del análisis a fatiga	52
4.5.6	Resultados análisis de fatiga	53
5	ANÁLISIS ESTÁTICO Y DE FATIGA DE UNA BIELA DE BICICLETA	56
5.1	Estudio 1. Biela de acero aleado	56
5.1.1	Análisis estático	56
5.1.2	Análisis de fatiga	60
5.2	Estudio 2. Biela de aluminio 7075-T6	64
5.2.1	Análisis estático	64
5.2.2	Análisis de fatiga	68
5.3	Estudio 3. Biela de titanio Ti-6Al-4V	71
5.3.1	Análisis estático	71
5.3.2	Análisis de fatiga	75
5.4	Comparativa de resultados	78
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
	LISTA DE REFERENCIAS	81



ANEXO A .....	83
A.1 Plano de la biela en SOLIDWORKS .....	83
A.2 Plano del eje de pedalier en SOLIDWORKS .....	83
A.3 Plano del pedal en SOLIDWORKS.....	83

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Draisiana, 1830 .....	3
Ilustración 2 Velocípedo de 1862 de los hermanos Michaux. ....	4
Ilustración 3 High wheler o Grand Bi, 1878. ....	4
Ilustración 4 Rover Safety Bicycle de 1885 .....	5
Ilustración 5 Evolución histórica de la bicicleta.....	5
Ilustración 6 Elementos generales de una bicicleta.....	6
Ilustración 7 Modelo mecánico para el análisis 2D del pedaleo .....	8
Ilustración 8 Fuerzas en el pedal (R.Bini 2014).....	9
Ilustración 9 Fases y puntos relevantes del pedaleo (R.Bini 2014) .....	9
Ilustración 10 Ejemplo de relación con el usuario. Iphone X. ....	10
Ilustración 11 Miguel Indurain montado en la Pinarello de acero 1994 .....	13
Ilustración 12 Cuadro de fibra de carbono .....	15
Ilustración 13 Comparativa materiales ciclismo.....	16
Ilustración 14 Rotura de un eje debido a la fatiga .....	17
Ilustración 15 Extrusiones e intrusiones previas a la grieta .....	18
Ilustración 16 Comportamiento fatiga. Ley de Paris .....	18
Ilustración 17 Máquina de Moore .....	19
Ilustración 18 Diagrama S-N material férreo.....	19
Ilustración 19 Relación entre tensión última y límite a fatiga de material .....	20
Ilustración 20 Área para diámetro efectivo A0,95 .....	22
Ilustración 21 Eje redondo con estrechamiento para cargas axiales y flexión .	24
Ilustración 22 Sensibilidad a la entalla para cargas axiales y flexión .....	24
Ilustración 23 Sensibilidad a la entalla para cargas de torsión .....	24
Ilustración 24 Esfuerzo alterno senoidal.....	25
Ilustración 25 Relaciones de Gerber, Goodman y Soderberg .....	26
Ilustración 26 Representación esquemática del daño acumulativo .....	27
Ilustración 27 Curvas de daño de dos tensiones diferentes .....	28
Ilustración 28 Conjunto de platos Q-rings y bielas ALDHU. Rotor.....	29
Ilustración 29 Eje de pedalier integrado en la biela HOLLOWTECH II.....	30
Ilustración 30 Sistema de transmisión FSA Gossamer .....	31
Ilustración 31 Planos biela bicicleta extensible 2015.....	32
Ilustración 32 Plano bielas independientes sin punto muerto.....	33
Ilustración 33 Planos ilustrativos biela hueca 2003 .....	34
Ilustración 34 Algunos planos biela Shimano 2004 .....	34
Ilustración 35 Ensayo de fatiga con pedales a 45º.....	36
Ilustración 36 Ensayo de fatiga con pedales a 30º (bicicletas de montaña) .....	37
Ilustración 37 Diseño hecho con Solidworks .....	38
Ilustración 38 Biela derecha bicicleta .....	39
Ilustración 39 Bielas Shimano Acera y Altus .....	40
Ilustración 40 Eje pedalier de cuadrado. Modelo vs eje Shimano .....	40
Ilustración 41 Pedal modelo vs real.....	41
Ilustración 42 Ensamblaje pedal, biela y eje de pedalier .....	42

Ilustración 43 Modelo CAD y modelo mallado con elementos tetraédricos .....	44
Ilustración 44 Elemento sólido lineal y elemento sólido parabólico .....	44
Ilustración 45 Ejemplos de malla de vaciado.....	45
Ilustración 46 Sujeciones y cargas de la pieza.....	46
Ilustración 47 Biblioteca de materiales Solidworks.....	47
Ilustración 48 Resultado tensiones Von Mises .....	48
Ilustración 49 Ventana sucesos fatiga .....	49
Ilustración 50 Carga completamente invertida $R=-1$ .....	50
Ilustración 51 Carga de tracción $R=0$ .....	50
Ilustración 52 Carga en función de la relación de carga.....	50
Ilustración 53 Introducción manual curva S-N.....	51
Ilustración 54 Propiedades del análisis a fatiga.....	52
Ilustración 55 En rojo aplicado el factor y en azul sin aplicar .....	53
Ilustración 56 Porcentaje de daño .....	54
Ilustración 57 Resultado de biaxialidad .....	55
Ilustración 58 Propiedades del acero aleado .....	56
Ilustración 59 Fuerzas y sujeciones en la biela de acero aleado.....	57
Ilustración 60 Mallado fino acero aleado .....	57
Ilustración 61 Tensiones acero aleado.....	58
Ilustración 62 Puntos concentración de tensiones en biela y pedal de acero ..	58
Ilustración 63 Máxima tensión Von Mises en la biela de acero aleado .....	59
Ilustración 64 Deformaciones en la biela de acero aleado .....	59
Ilustración 65 Máxima deformación unitaria en la biela de acero aleado .....	60
Ilustración 66 Diagrama S-N aceros.....	60
Ilustración 67 Introducción manual curva S-N acero aleado .....	61
Ilustración 68 Curva S-N acero aleado.....	61
Ilustración 69 Propiedades del análisis de fatiga del acero aleado .....	62
Ilustración 70 Porcentaje de daño biela acero aleado.....	62
Ilustración 71 Vida total en ciclos del acero aleado.....	63
Ilustración 72 Puntos mínima vida biela de bicicleta de acero aleado.....	63
Ilustración 73 Propiedades del aluminio 7075-T6.....	64
Ilustración 74 Fuerzas y sujeciones en la biela de aluminio 7075-T6.....	65
Ilustración 75 Tensiones aluminio 7075-T6.....	65
Ilustración 76 Puntos concentración tensiones en biela y pedal de aluminio ...	66
Ilustración 77 Máxima tensión Von Mises en la biela de aluminio 7075-T6 .....	66
Ilustración 78 Deformaciones en la biela de aluminio 7075-T6 .....	67
Ilustración 79 Máxima deformación unitaria en la biela de aluminio 7075-T6 ..	67
Ilustración 80 Introducción de la curva S-N aluminio con la biblioteca .....	68
Ilustración 81 Diagrama S-N aluminio 7075-T6.....	68
Ilustración 82 Propiedades del análisis de fatiga del aluminio 7075-T6 .....	69
Ilustración 83 Porcentaje de daño biela aluminio 7075-T6.....	69
Ilustración 84 Vida total en ciclos del aluminio 7075-T6.....	70
Ilustración 85 Puntos mínima vida biela de bicicleta aluminio 7075-T6.....	70
Ilustración 86 Propiedades del Titanio Ti-6Al-4V.....	71
Ilustración 87 Fuerzas y sujeciones en la biela de titanio Ti-6Al-4V .....	72

Ilustración 88 Tensiones titanio Ti-6Al-4V .....	72
Ilustración 89 Puntos concentración de tensiones en biela y pedal de titanio..	73
Ilustración 90 Máxima tensión Von Mises en la biela de titanio Ti-6Al-4V .....	73
Ilustración 91 Deformaciones en la biela de titanio Ti-6Al-4V .....	74
Ilustración 92 Máxima deformación unitaria en la biela de titanio Ti-6Al-4V ....	74
Ilustración 93 Introducción de la curva S-N titanio con la biblioteca.....	75
Ilustración 94 Diagrama S-N titanio Ti-6Al-4V .....	75
Ilustración 95 Propiedades del análisis de fatiga del titanio Ti-6Al-4V .....	76
Ilustración 96 Porcentaje de daño biela titanio Ti-6Al-4V .....	76
Ilustración 97 Vida total en ciclos del titanio Ti-6Al-4V .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coeficientes a y b de acabado superficial $ka$ .....	21
Tabla 2 Factor de confiabilidad $kc$ .....	22
Tabla 3 Factor de temperatura $kd$ .....	23
Tabla 4 Fuerzas y ciclos de ensayo para distintos tipos de bicicleta.....	36
Tabla 5 Comparativa resultados estudio estático y de fatiga .....	78

## GLOSARIO

A continuación se exponen las definiciones y abreviaturas empleadas en el siguiente trabajo, que podrían presentar dificultades para su comprensión.

- **Velocípedo:** vehículo con ruedas movido a pedales.
- **Fuerzas anteroposteriores:** fuerzas que van de delante a atrás.
- **Concurrencia:** concurso simultáneo de varias circunstancias.
- **Colabilidad:** facilidad de un material para ser conformado en un molde desde estado líquido.
- **Kevlar:** poliamida sintetizada.
- **Aramida:** polímero sintético, ligero y muy resistente, que se utiliza en la fabricación de tejidos y plásticos.
- **Racores:** piezas metálicas para unir tubos.
- **Puntos concentración de tensiones:** localización dentro de un sólido elástico donde el campo de tensiones se concentra.
- **Discontinuidad:** falta de continuidad geométrica.  
:
- **Punto muerto:** situación en la que los pedales están en la posición superior e inferior verticalmente.
- **Modular:** que está formado por varias partes.
- **Coaxialidad:** que comparten un eje común.
- **Deformación unitaria:** relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento.
- **Vida mínima:** número de ciclos ensayados antes del fallo.

# INTRODUCCIÓN

## Motivación

En la actualidad el grado de competitividad de una empresa depende en gran medida de su capacidad para innovar. El proceso de fabricación de productos es cada vez más óptimo mejorando los tiempos, la calidad y el coste. Esto se traduce en una necesidad, para las oficinas técnicas, de desarrollar sistemas de simulación por ordenador que certifiquen y perfeccionen la utilidad de un producto consiguiendo gracias a ello una mejora de la calidad y fiabilidad.

Los programas de simulación son herramientas muy útiles, ya que con su ayuda, se consigue analizar el producto antes de la construcción del prototipo real, con el consecuente ahorro en tiempo, costes de producción y mejora del producto.

Y es que, la calidad y fiabilidad de un producto son factores determinantes en su creación. Ambas están íntimamente relacionadas con el fenómeno de fatiga, que puede hacer que el producto no cumpla con su función o que directamente se rompa.

Para ello, con el presente trabajo se estudian los esfuerzos y el fenómeno de la fatiga en una pieza valiéndose de las herramientas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) e Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE).

## Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es analizar los esfuerzos y la fatiga que sufre una biela de bicicleta para distintos materiales utilizando un programa, el SOLIDWORKS, que trabaja mediante el Método de los Elementos Finitos.

## Documentación

El núcleo del trabajo se divide en cinco capítulos, siendo el primero el que expone los conceptos previos necesarios para la comprensión del trabajo.

En el segundo se profundiza en el estado del arte, centrándose en: el mercado, las patentes y la normativa.

El tercer capítulo muestra brevemente el proceso seguido para la modelización de las piezas de la biela de bicicleta.

Más adelante, en el cuarto capítulo se hace una pequeña introducción a la simulación de ensayos en SOLIDWORKS Simulation.

Finalmente, en el quinto y último capítulo se analiza estáticamente y a fatiga la biela de bicicleta con distintos materiales.



# 1. CONCEPTOS INICIALES

## 1.1. BIOMECÁNICA DEL CICLISMO

En esta introducción general a la biomecánica del ciclismo se profundizará en la historia de la bicicleta, las partes que la forman y las fuerzas a las que está sometida.

### 1.1.1 Historia de la bicicleta

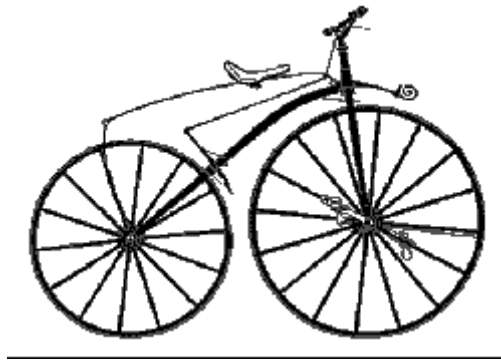
Todos los inventos son el resultado de intentar satisfacer una necesidad. También se dan casos en los que los inventos aparecen como evolución de lo que inicialmente era un divertimento intelectual. Lo que sí está claro es que la bicicleta es el resultado de la evolución de un juguete, en concreto del Célérifère de 1791 que venía a ser un chasis macizo de madera con forma de animal y con dos ruedas con el que sólo se podía ir en línea recta. Este juguete de niños ricos permaneció inalterado más de 20 años antes de que alguien le colocase un artilugio para cambiar de dirección.

De ello se encargó el ingeniero alemán Karl Von Drais quien aplicando la ingeniería de la época le adaptó una dirección. Estas modificaciones darán origen a la llamada Draisiana. Ésta se manejaba como un patinete impulsado por el arrastre de los pies sobre el suelo.



*Ilustración 1 Draisiana, 1830*

Los pedales como mecanismos para impulsar una rueda son obra de los hermanos Michaux en 1861 que crean un velocípedo con tracción delantera mediante unas bielas fijadas en el eje de la rueda.



*Ilustración 2 Velocípedo de 1862 de los hermanos Michaux.*

Los ingleses avanzando con la idea entre 1865 y en 1870 agrandarán la rueda delantera hasta crear la llamada BI o "High Wheeler". El objetivo era conseguir más velocidad con menos peso, pero también con un menor equilibrio. La inestabilidad debida a la altura no facilitó que fuera usada como vehículo de desplazamiento, aunque sí como deporte.



*Ilustración 3 High wheler o Grand Bi, 1878.*

El 31 de mayo de 1868 fue una fecha básica para la popularización del ciclismo. Los hermanos Olivier, asociados de la fábrica de Michaux organizaron una carrera de velocípedos en el parque de Saint Cloud de París con 1.200 m de recorrido en la que tomaron parte 7 ciclistas con los velocípedos de Michaux. La fiebre del ciclismo había nacido. El primer Tour de Francia se disputará en 1903 con un recorrido de 2428 kilómetros.

Otras mejoras importantes que se incorporaron a la bicicleta fueron el rodamiento con neumáticos. Así en 1888 John Boyd Dunlop sustituyó las bandas de caucho macizo de las ruedas por el neumático hinchado que facilitaba un rodaje más cómodo y rápido. Mientras en Francia, los hermanos Michelin crearon un neumático desmontable, en Italia Giovanni Battista Pirelli hizo lo propio. Con el neumático de caucho y unas cuantas cámaras de recambio se

podía ir a todas partes. Los frenos de zapata para detener las ruedas aparecerán en 1893.

El invento que comportará el lanzamiento de la bicicleta como vehículo para desplazarse será la transmisión por cadena entre dos engranajes (el plato y el piñón), obra del francés Guilmet y del británico Harry John Lawson aproximadamente en 1884. En esta fecha también aparece la primera bicicleta con transmisión a cadena con las dos ruedas iguales obra de John Kemp Starley conocida como Rover Safety Bicycle. Sin duda, este modelo debe considerarse el precursor de la forma de la moderna bicicleta.



Ilustración 4 Rover Safety Bicycle de 1885

El fenómeno ciclista tendría a finales del siglo XIX un gran auge en todos los países. El siglo XX tan sólo conseguirá añadir algunas mejoras en la bicicleta como el cambio de marchas.

Lógicamente, la evolución de nuevos materiales cada vez más ligeros y resistentes también será esencial para diseñar bicicletas robustas como las de montaña o versátiles como las plegables.

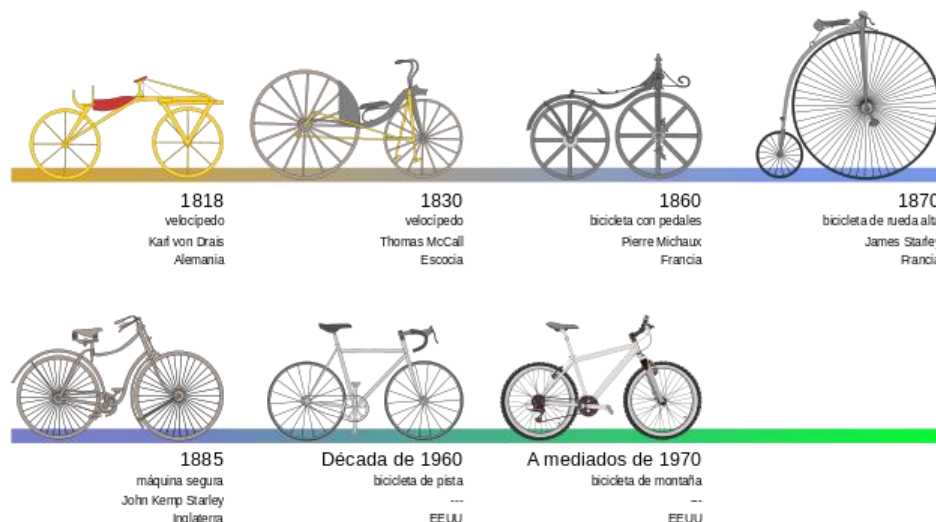


Ilustración 5 Evolución histórica de la bicicleta

### 1.1.2 Anatomía de la bicicleta

A continuación se presenta un modelo de bicicleta actual en la que se distinguen distintas partes:

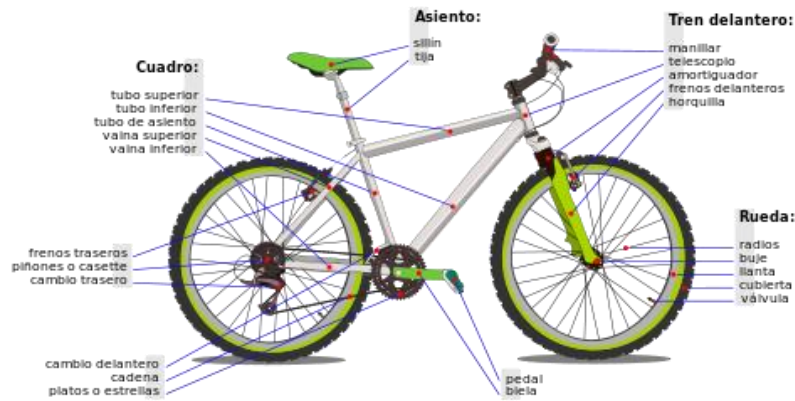


Ilustración 6 Elementos generales de una bicicleta

#### Cuadro

Por lo general el cuadro cuenta con 3 tubos. El tubo del asiento es sobre el que se deposita la tija del sillín y que se une con el eje pedalier.

De él surgen el tubo inferior y el superior que se encuentran en el telescopio, la zona baja del manillar.

Las vainas unen el eje de la rueda trasera con el tubo del asiento, vaina superior, y con los pedales, vaina inferior.

#### Ruedas

Se componen de: llantas, radios, buje, cubierta y válvula.

Sobre la superficie de las llantas se asienta el neumático de la bicicleta. Estas se unen mediante alambres, llamados radios, al eje de la rueda. Los radios soportan las fuerzas de compresión y de tracción a las que está sometida la rueda mientras gira.

Al eje de la rueda se le llama buje. En este punto central convergen los radios de la rueda. Con frecuencia permiten la instalación de frenos de disco.

La cubierta es el elemento de la rueda que contacta con el terreno. Suele ser de caucho y varía sus dimensiones según el tipo de bicicleta. Sus funciones son: proporcionar un buen agarre y proteger la cámara de aire de goma del interior. La presión del aire de la cámara se regula mediante la válvula.

### *Asiento*

Está compuesto por el sillín y la tija. El sillín soporta parcialmente el peso del ciclista y es la parte en la que éste se sienta. Los hay de distintas formas y tamaños, todo dependerá del tipo de bicicleta en el que se usen.

La tija es el tubo que se une a la parte inferior del sillín. Se encuentran tijas de diferentes diámetros y materiales, siendo su función regular la altura del asiento que permita encontrar una correcta posición de pedaleo.

### *Tren delantero*

Lo forman el manillar, la potencia, el tubo de dirección, la horquilla, los amortiguadores y los frenos delanteros.

El manillar soporta parte del peso del ciclista y su función principal es dirigir la trayectoria de la bicicleta. Contiene las manetas de freno, izquierda para el delantero y derecha para el trasero, y las manetas de cambio, que alternan los platos y piñones.

La potencia, también conocida como tija del manillar, une la horquilla a través del tubo de dirección al manillar.

El tubo de dirección sirve como eje del manillar. Asume gran parte de la fuerza que se ejerce sobre el manillar.

La horquilla es la estructura que conecta el eje de la rueda delantera al cuadro de la bicicleta. En las bicicletas de montaña sobre todo se suele incorporar la suspensión o amortiguador delantero. La suspensión suaviza los impactos a los que está sometida la bicicleta facilitando el manejo y haciéndola más cómoda para el ciclista.

Los frenos delanteros generalmente son de llanta o de disco. Los primeros funcionan con unas zapatas que friccionan con la llanta frenándola. En los segundos se coloca un disco en el eje de la rueda y éste sufre la fricción.

## Tren trasero

Estos elementos son los encargados de transmitir el esfuerzo del ciclista a la bicicleta.

Los cambios, platos y piñones marcan la exigencia y el ritmo de pedaleo. El cambio trasero alterna los piñones, que se sitúan en el eje de la rueda trasera, y el cambio delantero el plato, ubicado en el eje del pedal. Platos y piñones interaccionan mediante la cadena.

Los pedales transmiten la energía cinética que genera el ciclista a la rueda trasera. La biela es la estructura que une el pedal al plato de la bicicleta. Proporciona una mayor flexibilidad y amplitud de movimiento al ciclista.

Este último elemento de la bicicleta, la biela, va a ser objeto de estudio a lo largo del siguiente documento.

### 1.1.3 Fuerzas en el pedal, biela y eje pedalier

Antes de comenzar con la exposición de las fuerzas que actúan en este conjunto hay que aclarar dos aspectos que pueden llevar a error. La fuerza  $F$ , cuya unidad de medida es el Newton (N), es la fuerza total que se ejerce sobre los pedales. Y la potencia  $P$ , medida en vatios (W), el producto de fuerza y velocidad lineal. En términos de ciclismo cuanto mayor cadencia de pedaleo y mayor desarrollo, la potencia generada en el conjunto de transmisión aumenta.

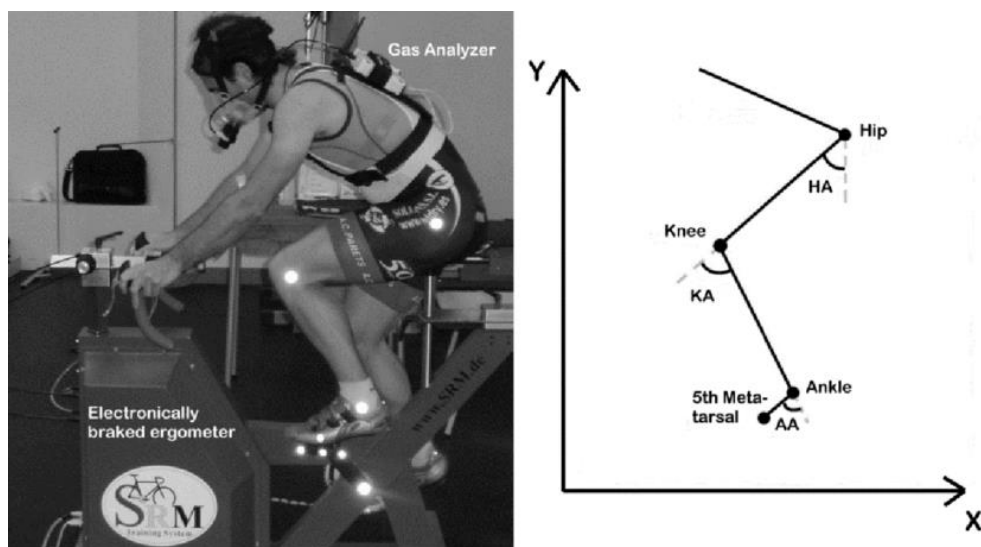


Ilustración 7 Modelo mecánico para el análisis 2D del pedaleo

Para la contabilización de la fuerza total ejercida sobre los pedales se tienen en consideración las fuerzas normales ( $F_y$ ) y las anteroposteriores ( $F_x$ ). No se tiene en cuenta la fuerza media lateral ( $F_z$ ) ya que esta no ayuda a la propulsión de la bicicleta.



Ilustración 8 Fuerzas en el pedal (R.Bini 2014)

La posición del pedal respecto a la biela y la posición del pie del ciclista en la cala influyen en la aplicación de la fuerza. Una correcta colocación de ambas hará que aumente el valor de la fuerza transmitida.

Aquella fuerza que se transmita directamente a la biela será la que haga que la bicicleta se propulse. A esta fuerza se le conoce como fuerza efectiva (EF).

Finalmente, el producto de las fuerzas efectivas en las bielas y la longitud de éstas definirán el momento de propulsión aplicado al plato y posteriormente transmitido a la rueda.

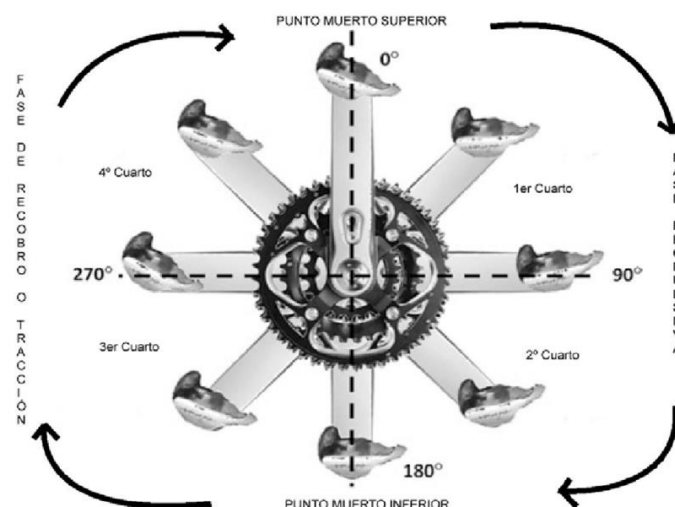


Ilustración 9 Fases y puntos relevantes del pedaleo (R.Bini 2014)



## 1.2 MATERIALES

### 1.2.1 Selección de materiales en el diseño de piezas

La selección de materiales es una de las piedras angulares en el diseño de piezas o componentes de un conjunto mecánico. Se exponen a continuación, de forma general, las consideraciones que más hay que tener en cuenta para una buena elección de material:

#### *Ciclo de vida*

El material elegido debe responder a los requerimientos de la pieza. Esta *respuesta a la función* está íntimamente relacionada con las características físicas y mecánicas. Se debe tener en cuenta la concurrencia de las cualidades para una función. Un ejemplo sería la selección de un material, aunque sea caro, de propiedades elevadas para un elemento muy solicitado, consiguiendo una mejora en el peso y dimensiones del conjunto.

La selección del material también está muy ligada con el método de *conformación y fabricación* de la pieza. A pesar de que un material tenga las propiedades requeridas para una función, si su conformado es difícil o supone un coste excesivo es un aspecto negativo a valorar.

Entre materiales candidatos equivalentes, el *coste y suministro* son determinantes en la selección final.

La *relación con el usuario* adquiere cada vez más importancia en la selección de materiales. En ocasiones se buscan materiales con facilidad para dar formas, colores y texturas atractivas, tacto amigable, sensación de solidez o de ligereza...



*Ilustración 10 Ejemplo de relación con el usuario. Iphone X.*

Otro de los, relativamente nuevos, condicionantes es la *facilidad de reciclaje*, tanto por imposición legal como por ética.



### *Grado de innovación*

Este aspecto se puede enfocar hacia dos soluciones: experimentadas o innovadoras. Las primeras, más prudentes, se basan en el análisis de materiales usuales para esa aplicación. Las soluciones innovadoras surgen generalmente cuando la selección del material tiene una capacidad transformadora, es decir, el producto es competitivo gracias a la innovación de un material tradicional o bien a la inclusión de uno nuevo.

### *Características y propiedades de los materiales*

Una buena información base y herramientas para procesar e interpretar esta información son aspectos cruciales para la selección del material. Para ello es interesante una *organización de los datos sobre propiedades de los materiales*, de forma sistematizada y coherente, orientada a la fase inicial de selección. Para la fase final de selección se acude a las bases de datos más especializadas.

Las clasificaciones de materiales según una propiedad individual (resistencia a la tracción, conductividad eléctrica, reflectividad) dan unos primeros criterios de selección. Más adelante se cuantifica la influencia combinada de varias propiedades (resistencia por unidad de masa, conductividad eléctrica por unidad de coste), llegando a una visión cuantitativa más profunda y más ajustada para una aplicación determinada.

### 1.2.2 Materiales en el ciclismo

La evolución en el mercado de las bicicletas ha estado muy ligada a la mejora de los materiales y éstos, a su vez, a los progresos en el estado de la técnica.

La industria ciclista bebe de otras industrias como la náutica, la aeroespacial o la del automóvil para adoptar y adaptar el mayor número de mejoras posibles. Pero este sector también innova y experimenta constantemente con materiales y componentes.

Los materiales más comunes que se pueden encontrar en el mundo del ciclismo son: el acero, el aluminio, la fibra de carbono, el titanio...

#### *Acero y aleaciones*

El acero, una aleación obtenida entre hierro y carbono, es el material más utilizado en la historia de la fabricación de bicicletas, casi desde sus inicios hasta la actualidad.

El uso del acero en el ciclismo se popularizó por lo fácil y económico que es de trabajar y el buen resultado que ofrece en cuanto a rigidez, durabilidad, resistencia y peso. Además en caso de alguna falla es sencillo de soldar y reparar.

Entre sus propiedades mecánicas destaca una resistencia a la rotura muy alta, permitiendo unos espesores mínimos. Asimismo para conseguir un metal más equilibrado y con mejores propiedades se recurre al uso aleado de otros elementos como:

- Cobalto: aumenta la dureza del acero en caliente.
- Cromo: eleva la dureza, resistencia a la abrasión y corrosión, así como la tenacidad a cualquier temperatura. Le proporciona propiedades inoxidable.
- Manganeso: aumenta la colabilidad y la resistencia al desgaste.
- Molibdeno: junto con el carbono es el elemento más eficaz para endurecer el acero, evitando su fragilidad y aumentando su resistencia al calor y al desgaste.
- Níquel: es un elemento que, asociado al acero, le proporciona propiedades anticorrosivas.
- Silicio: es un antioxidante y proporciona elasticidad en una aleación.
- Tungsteno: eleva la dureza.
- Vanadio: se emplea como desoxidante en las aleaciones proporcionando, además, muy buena resistencia a la fatiga y a la tracción.
- Niobio: eleva la resistencia a la fatiga.

En la fabricación de cuadros, por ejemplo, la aleación más utilizada es la Cromoly (acero al cromo molibdeno).

En general, estas características explican también su larga vida en el ciclismo, ya que el aluminio, más ligero pero menos resistente, necesitó muchos años de desarrollo para lograr las mismas cotas de rigidez y resistencia.

Curiosamente el acero ha pasado de ser el material más común en el ciclismo a convertirse, hoy en día, en un material elitista y alejado de las gamas bajas.

Para apreciar la dilatada trayectoria de este material en la industria ciclista basta con saber que la última bicicleta de acero en ganar el Tour de Francia fue la Pinarello de Miguel Indurain en 1994.



*Ilustración 11 Miguel Indurain montado en la Pinarello de acero 1994*

## Aluminio

En la actualidad gran parte de las marcas comerciales de bicicletas tienen gamas bajas y medias fabricadas en aluminio. No en vano es el material más utilizado en la industria ciclista, tanto para fabricación de cuadros como para componentes.

La llegada de este metal supuso una revolución en la industria ya que al ser más maleable que el acero, se podía experimentar mucho más con las geometrías y las formas de las piezas. En particular los cuadros, gracias al conificado (se refuerzan los extremos que soportan la soldadura, donde hay más debilitamiento) son más ligeros y resisten mejor la corrosión que el acero.

El aluminio sólo es demasiado blando, por lo que se alea con otros metales dando lugar a diversas series y modelos:

- Aluminio 6061: utilizado en los componentes más económicos y genéricos. Es una aleación de la serie 6000 que contiene magnesio y silicio, y se somete a un templado tipo T4 o T6.
- Aluminio 7075: los aluminios de la serie 7000 incluyen mayoritariamente zinc. El modelo 7075, conocido como Zicral, se mecaniza en una sola pieza ya que no se puede soldar. Se suele recubrir con capas de fibra de carbono.
- Aluminio 2014 –T6: es una de las aleaciones de aluminio con cobre, usada por la industria aeroespacial, y utilizada en los componentes de bicicleta de más alta calidad. Es muy difícil de soldar, porque se fisura y de fácil corrosión a la intemperie por lo que se debe tratar con aluminio puro exteriormente o recubrirlo con pintura.

En la competición profesional la vida del aluminio ha sido más corta que la del acero y la fibra de carbono. La última victoria de una bicicleta con un cuadro de aluminio en el Tour fue la de Marco Pantani en 1998 con su Bianchi.

A partir de 1999 comienza la era del carbono y ésta se prolonga hasta hoy.

### *Fibra de carbono*

La fibra de carbono es el material más utilizado en las gamas medias y altas en el presente para todo tipo de bicicletas como las de carretera, mountain bike, urbanas, pista...

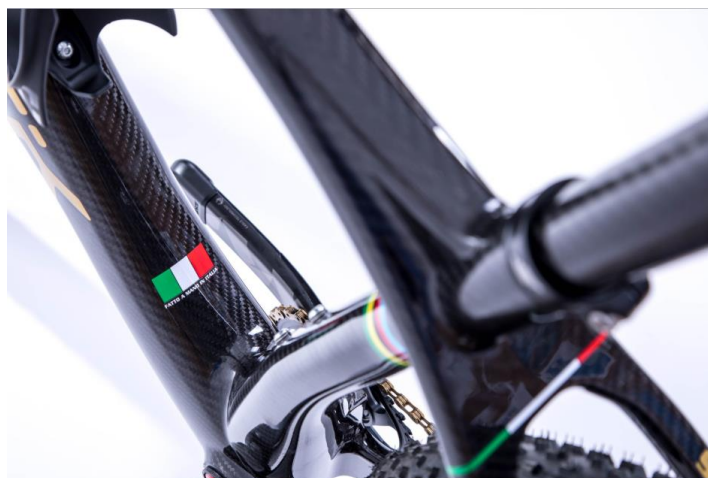
La fibra de carbono es una fibra sintética, un tipo de composite, formada por átomos de carbono unidos en filamentos y con un contenido mínimo del 92% de carbono. Frecuentemente se complementa con otros materiales como la fibra de vidrio, nylon, Kevlar, aramida...

Existen dos tipos de fibra de carbono: las de alto módulo, que se caracterizan por su elasticidad, y las de alta resistencia, por su gran resistencia a la rotura.

El módulo es el número de filamentos que forman cada fibra y, dependiendo de este número, el resultado es más o menos denso, resistente y elástico. Los tipos de fibras más usadas en la industria ciclista son las de alto módulo 3K, de 3.000 filamentos, más ligeras y flexibles, pero menos resistentes; y las de 12K, más robustas, pesadas y resistentes.

Según el uso y las propiedades que se busquen, las fibras se disponen de forma entrelazada o unidireccional. La trenzada ofrece una mayor resistencia a la rotura que la unidireccional, pero la última responde mejor a la torsión y es más rígida. Esto se traduce en un uso de fibras trenzadas en las zonas generales de los cuadros y componentes. Las fibras unidireccionales, en cambio, se

destinan a zonas que necesitan mayor rigidez y resistencia a la tracción, como el eje del pedalier, las vainas o el tubo de dirección.



*Ilustración 12 Cuadro de fibra de carbono*

En sus inicios la fibra de carbono se trabajaba con el sistema Tube to Tube. Este sistema consistía en la unión de los tubos de fibra de carbono mediante racores de aluminio, acero o titanio pegados con resina.

Hoy en día, la técnica de moldeo consiste en poner las láminas de carbono en un molde pegándolas con resina. Después se hornean y prensan hasta conseguir la forma definitiva, sólida y compacta.

En resumen, la fibra de carbono es un material con unas grandes propiedades mecánicas y con muchas posibilidades que lo convierten en un material de presente y futuro.

### *Titanio*

El titanio es un metal muy abundante en la corteza terrestre, pero siempre aparece unido a otros elementos, lo que dificulta enormemente su extracción y separación. En consecuencia, es uno de los elementos más caros de conseguir.

Su principal característica es la resistencia a la corrosión y una gran resistencia y dureza respecto a otros metales. Además, el titanio utilizado en ciclismo es más ligero que el acero e incluso que el aluminio. No obstante, existen diferentes tipos de aleaciones de titanio: con aluminio, vanadio o molibdeno, por ejemplo.

La desventaja de ser tan duro es que es muy complicado de trabajar, necesitando maquinaria especializada para tratarlo y unas temperaturas de soldadura mucho más altas que las del resto de metales. Además de que necesita una tubería algo más gruesa que el acero para lograr la misma rigidez, elevando su peso en los cuadros con prestaciones de competición.

Estas dificultades en su extracción y su fabricación hacen que el precio final sea muy elevado, convirtiéndolo en un producto elitista.

### Comparativa materiales

A modo de resumen, se realiza una comparativa entre los anteriores materiales resaltando sus puentes fuertes y débiles.

El proceso de fabricación de acero de gran calidad es relativamente barato, lo que es un punto positivo. Además posee gran resistencia a la rotura y soporta muchas deformaciones antes de la fatiga. Sus puntos débiles son el peso y la vulnerabilidad ante la corrosión.

Para extraer el aluminio de su mineral, la bauxita, hay que emplear mucha energía, por lo que su precio es más elevado que el del acero. A pesar de ser un material ligero, alrededor del 50% del peso del acero, su resistencia a la deformación, a la fatiga y a la rotura obliga a la utilización de tubos de mayores dimensiones, elevando su peso aunque no llegue a los valores del acero. Por otra parte, el aluminio amortigua hasta cinco veces más que el acero proporcionando una mayor comodidad al usuario.

Aunque el punto fuerte del aluminio es la ligereza, no es rival para la fibra de carbono, teniendo entorno a un 60% menos peso que el acero. La fibra de carbono también gana en: rigidez (siendo un 35% más rígido que el cromoly), resistencia a la fatiga y a la rotura (tres veces mayor que el acero) y en vulnerabilidad a los elementos externos. Sin embargo su gran defecto es el precio que llega a ser entre 5 y 10 veces más caro que el del acero.

El elevado precio del titanio es su principal enemigo, producido por lo difícil de su mecanización y por lo complejo del proceso de soldadura. La rigidez necesaria para competir con un cuadro de acero o aluminio sólo se consigue engrosando los tubos de titanio.

Sus ventajas vienen dadas por su gran resistencia a la fatiga, la ligereza y la inmunidad ante la práctica totalidad de elementos. Un cuadro de titanio es caro, pero muy duradero.

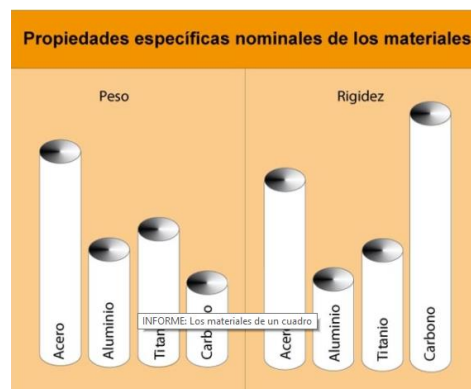


Ilustración 13 Comparativa materiales ciclismo

## 1.3 FUNDAMENTOS DE LA FATIGA

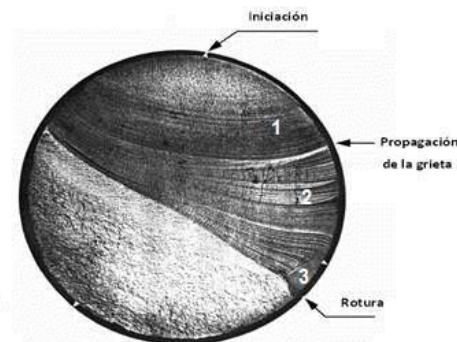
### 1.3.1 Rotura fatiga

#### *Desarrollo de la grieta*

Es importante percibir la fatiga que se produce en los elementos mecánicos que están sometidos a cargas variables, para poder actuar antes de que sea demasiado tarde e irreversible. Es difícil prever la rotura por fatiga a no ser que se detecte mediante una inspección.

Examinando la superficie típica de fatiga se diferencian distintas regiones.

- Región 1: se ajusta a una propagación lenta de la grieta, generalmente ocasionada por una gran concentración de tensiones.
- Región 2: crecimiento rápido de la grieta dejando una superficie irregular parecida a la de la rotura frágil.
- Región 3: se encuentra la zona de rotura de la sección, la cual no ha podido resistir la carga a la que ha sido sometida.



*Ilustración 14 Rotura de un eje debido a la fatiga*

El desarrollo de una grieta suele tener 3 fases diferenciadas que se corresponden con las zonas estudiadas en la figura anterior.

#### *Fases de la fatiga*

##### *Iniciación*

La grieta se inicia cuando la tensión y deformación son tan altas como para crear un deslizamiento alterno continuo en una zona. Generalmente estas grietas asociadas a la rotura por fatiga empiezan en puntos con concentración de tensiones.



Cuando un grano de la superficie se deforma, se genera un escalón en esa superficie, que se oxida inmediatamente. A continuación en otro plano se produce una deformación en sentido contrario, forma otro escalón y suprime la deformación en el nuevo plano.

Este ciclo de deformación, oxidación y bloqueo repetido hace que esa pequeña deformación se agrave y termine en la creación de una microgrieta.

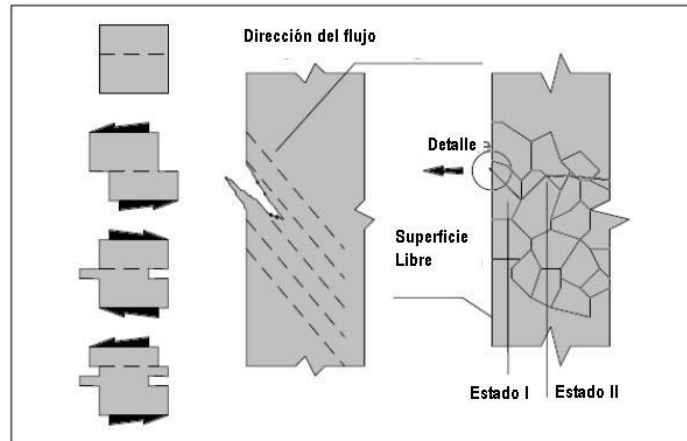


Ilustración 15 Extrusiones e intrusiones previas a la grieta

## Propagación

Cuando se ha nucleado la grieta comienza la etapa de propagación. Es un proceso que avanza muy lentamente y que a menudo se queda en una extensión de la grieta a través de varios granos.

Puntualmente, se produce una segunda etapa de propagación, en la cual la grieta aumenta drásticamente. La dirección de propagación cambia hasta llegar a ser perpendicular a la tensión aplicada.

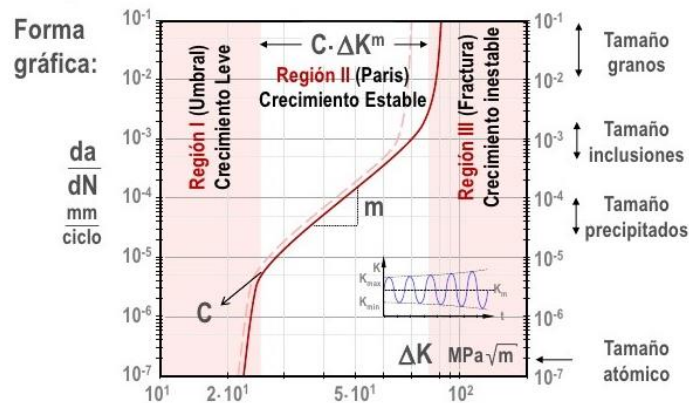


Ilustración 16 Comportamiento fatiga. Ley de Paris



## Rotura

Cuando la grieta alcanza un tamaño determinado, conocido como tamaño crítico de fisura, se produce la rotura de la pieza.

Esta fase carece de interés ya que se produce tan rápidamente que ni siquiera cuenta en la vida de la pieza.

### 1.3.2 Diagramas S-N

Los diagramas son una de las herramientas más útiles a la hora de representar la resistencia a la fatiga de un material. Estos diagramas se obtienen a partir del ensayo de viga rotatoria, realizado en la máquina de Moore, en el que una probeta de sección circular normalizada es sometida a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande.

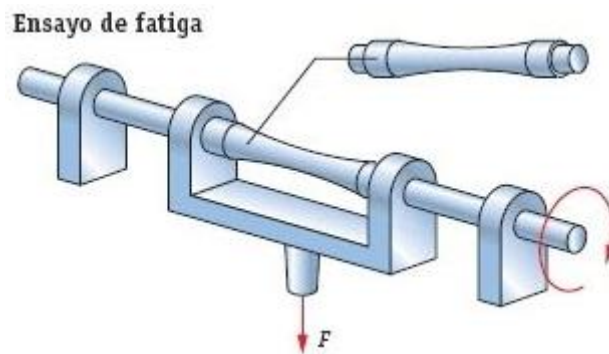


Ilustración 17 Máquina de Moore

Con este ensayo obtiene el número de ciclos antes de la rotura. Se repite este procedimiento en otras probetas con amplitudes máximas decrecientes hasta conseguir la gráfica característica de la resistencia a fatiga en el material.

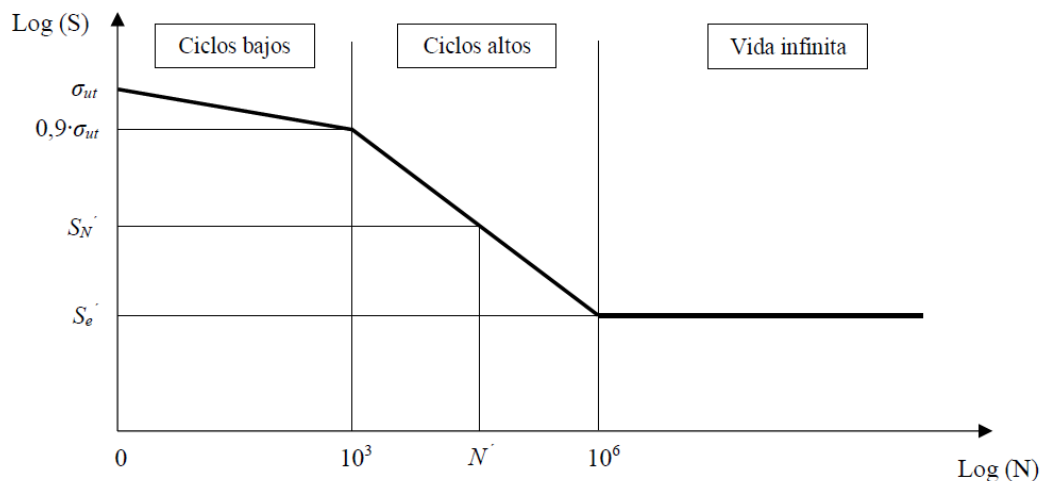


Ilustración 18 Diagrama S-N material férreo

Siendo  $S_N'$  la resistencia a la fatiga, valor de la tensión alterna que causa la rotura de la probeta tras un número de ciclos, y  $S_e'$  el límite a fatiga del material, valor de la tensión por debajo del cual la vida es infinita.

El último término que aparece en el diagrama es la tensión última a tracción  $S_{ut}$ , que de ser sobrepasada se produciría la fractura.

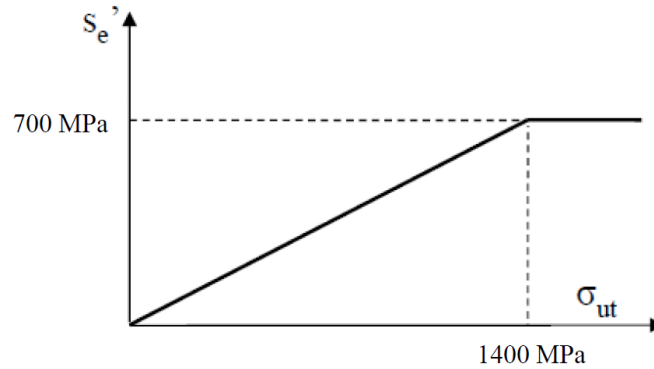


Ilustración 19 Relación entre tensión última y límite a fatiga de material

Mediante la relación entre varios ensayos se intenta encontrar una correlación entre estos términos. En el caso de los aceros se suelen utilizar las siguientes aproximaciones:

$$\sigma_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \rightarrow S_e' = 0,5 \cdot \sigma_{ut}$$

$$\sigma_{ut} > 1400 \text{ MPa} \rightarrow S_e' = 700 \text{ MPa}$$

### 1.3.3 Factores modificativos del límite de fatiga

#### Factor de acabado superficial ( $k_a$ )

La fatiga tiene sus inicios generalmente en la superficie de la pieza, comenzando los defectos en la misma en forma de pequeñas microgrietas. Por tanto el acabado superficial es uno de los factores que más hay que tener en cuenta a la hora de fabricar piezas sometidas a esfuerzos variables.

La existencia de una mayor rugosidad en la superficie produce una mayor concentración de tensiones.

Para el cálculo de  $k_a$  se utiliza la siguiente expresión:

$$k_a = a \cdot \sigma_{ut}^b$$

En la siguiente tabla se encuentran los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  según el acabado:

Acabado superficial	Coeficiente a (MPa)	Coeficiente b
Pulido	1	0
Acabado fino (esmerilado,rectificado,)	1,58	-0,085
Mecanizado / estirado en frío	4,51	-0,265
Laminado en caliente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Tabla 1 Coeficientes a y b de acabado superficial  $k_a$

### Factor de tamaño y geometría ( $k_b$ )

Las probetas rotatorias utilizadas en el ensayo de Moore son de sección circular de diámetro normalizado  $\varnothing 7,5$  y  $\varnothing 12,5$ mm. A medida que aumenta el tamaño de las piezas la resistencia a la fatiga tiende a disminuir.

En el caso de una carga axial, según qué autores:

$$K_b = 1 \text{ siendo } d < 10\text{mm}$$

$$K_b = 0,6 - 0,7 \cdot d \text{ (dependiendo excentricidad) siendo } d \geq 10\text{mm}$$

A flexión o torsión el factor de tamaño se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$K_b = \left( \frac{d}{7,62} \right)^{-0,133} \quad 2,79 \leq d \leq 51\text{mm}$$

$$K_b = 1,189 \cdot d^{-0,097} \quad 52 \leq d \leq 250\text{mm}$$

Para aquellas piezas que no tengan una sección circular se debe hallar un diámetro equivalente, conocido como diámetro efectivo. El diámetro efectivo se calcula con  $A_{0,95}$ , que es el área delimitada por puntos de sección sometidos a una tensión igual o mayor que el 95% del máximo.

Por ejemplo en una pieza de sección rectangular, el área es la parte coloreada:

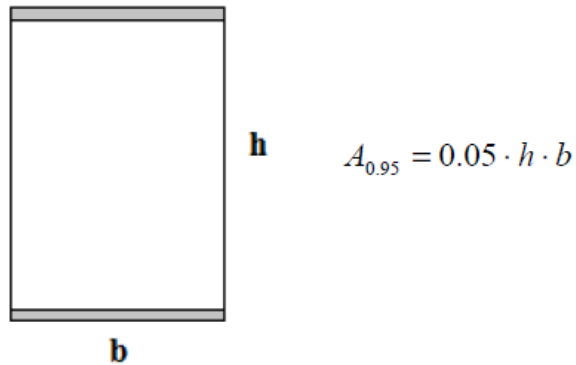


Ilustración 20 Área para diámetro efectivo  $A_{0,95}$

El área en una sección circular:

$$A_{0,95} = \frac{\pi}{4} [d_e^2 - (0,95 \cdot d_e)^2] = 0,0766 \cdot d_e^2$$

Juntando las dos expresiones anteriores:

$$d_e = \sqrt{\frac{0,05}{0,076} \cdot h \cdot b} = 0,808 \sqrt{h \cdot b}$$

### Factor de confiabilidad ( $k_c$ )

Confiabilidad	Factor de confiabilidad $k_c$
0,5	1
0,9	0,897
0,95	0,868
0,99	0,814
0,999	0,753
0,9999	0,702
0,99999	0,659
0,999999	0,620
0,9999999	0,584
0,99999999	0,551
0,999999999	0,520

Tabla 2 Factor de confiabilidad  $k_c$

### Factor de temperatura ( $k_d$ )

La temperatura influye en el comportamiento mecánico del material. Factores como la resistencia a la fluencia, la resistencia última y el límite de fatiga

se ven afectados por el cambio de temperatura. Esto se debe a que las altas temperaturas producen una agitación de las partículas del material ocasionando los cambios mencionados.

Es difícil calcular el valor del coeficiente por lo que es mejor realizar pruebas en laboratorio para determinarlo. En caso de que no se pueda, los valores estimados son los de la siguiente tabla:

Temperatura	Factor de temperatura
$T \leq 450^{\circ}\text{C}$	$K_d = 1$
$450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C}$	$K_d = 1 - 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 450)$

Tabla 3 Factor de temperatura  $k_d$

### Factor de concentración de tensiones ( $K_e$ )

Debido a las particularidades geométricas de muchas piezas se estudian aquellos puntos y discontinuidades especialmente críticos a fatiga en los cuales se producirán las mayores tensiones (agujeros, ranuras, chavetas). El valor de  $K_e$  se obtiene de la siguiente expresión:

$$K_e = \frac{1}{K_f}$$

Donde  $K_f$  es el factor de concentración de tensiones reducido a fatiga y es el cociente del límite de fatiga de las probetas sin discontinuidad y el límite de fatiga de las probetas con discontinuidad. Se despeja de la siguiente ecuación:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Los métodos tradicionales de resistencia de materiales no consideran los efectos locales a la hora de calcular la distribución de tensiones exceptuando casos simples. El factor de concentración de tensiones  $K_t$  es el que se encarga de ello.

El valor de  $K_t$  se obtiene de las siguientes gráficas dependiendo del tipo de carga, sección y discontinuidad:

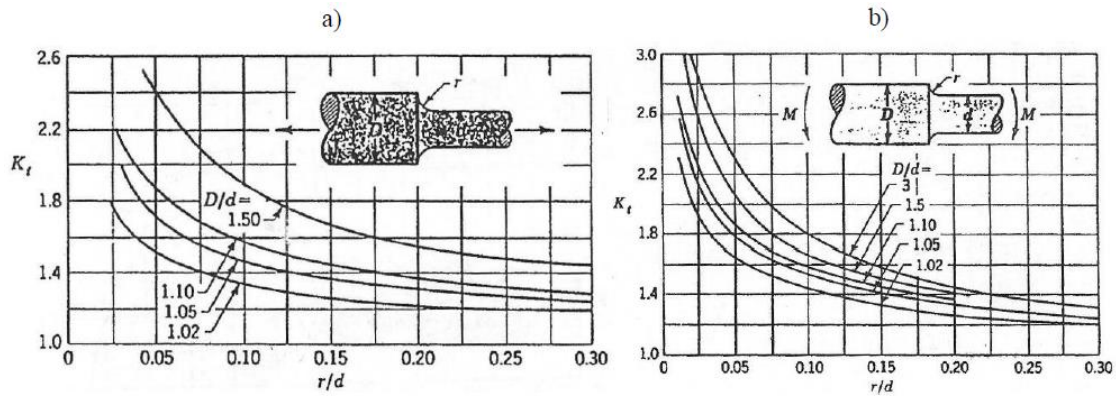


Ilustración 21 Eje redondo con estrechamiento para cargas axiales y flexión

También se debe hallar la sensibilidad a la entalla que depende del material y se encuentra en gráficas como esta:

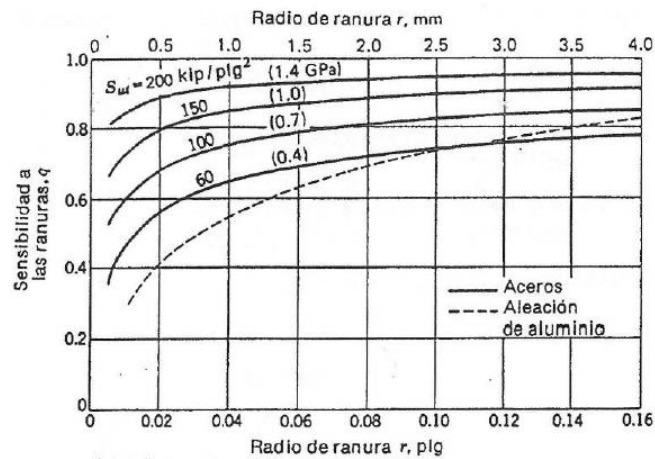


Ilustración 22 Sensibilidad a la entalla para cargas axiales y flexión

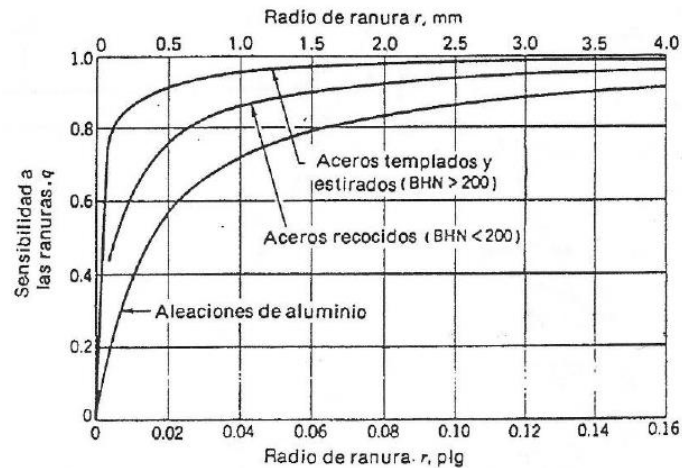


Ilustración 23 Sensibilidad a la entalla para cargas de torsión

### Factor de efectos diversos ( $K_f$ )

Este factor modifica el límite de fatiga tomando en cuenta el resto de variables que no se han estudiado anteriormente. Los aspectos más destacados son:

- Los esfuerzos residuales
- Las direcciones operacionales
- Los efectos del temple superficial
- Los efectos de corrosión
- Recubrimiento electrolítico
- Corrosión por apriete

#### 1.3.4 Tensiones fluctuantes

Como se ha comentado anteriormente la fatiga se produce al aplicarse cargas alternas sobre la pieza. Estos esfuerzos generalmente adoptan un patrón senoidal que facilita su estudio mediante un diagrama.

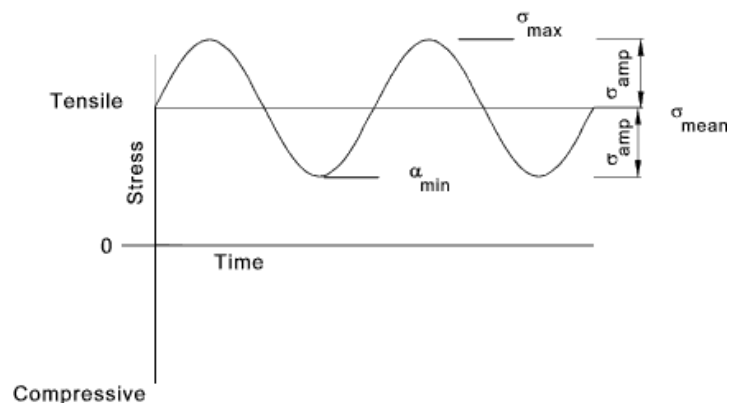


Ilustración 24 Esfuerzo alterno senoidal

A continuación se muestran los principios básicos de las tensiones alternas:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right|$$

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$$

$$A_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

$\sigma_m$ : Tensión media

$\sigma_a$ : Tensión alternante o amplitud de la tensión

$\sigma_{m\acute{a}x}$ : Tensión máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ : Tensión mínima

R: Razón de tensiones

$\Delta\sigma$ : Rango de tensiones

$A_a$ : Relación de amplitud

### Método de análisis con esfuerzo medio no nulo

El caso más general sin embargo es el de máquinas y piezas que están sometidas a esfuerzos fluctuantes con valor medio no nulo.

Cuando no se puede contar con ensayos experimentales como en el caso de la viga rotatoria ( $\sigma_m = 0$ ), se utilizan los siguientes criterios teóricos:

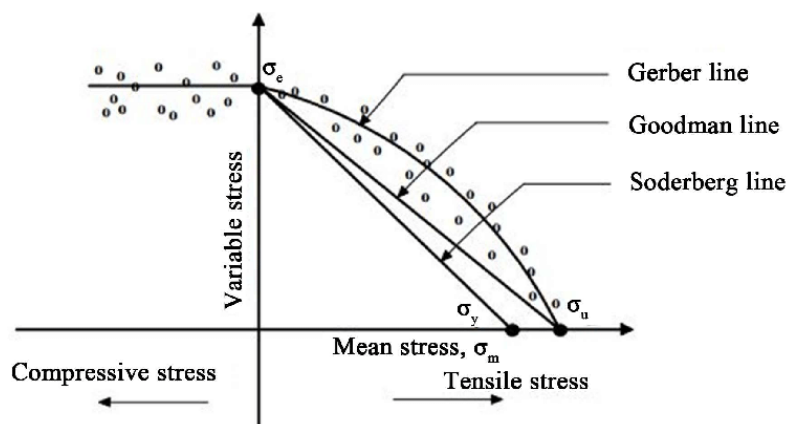


Ilustración 25 Relaciones de Gerber, Goodman y Soderberg

### Criterio de Gerber

Esta teoría no lineal se representa mediante una parábola que deja debajo de ella cierto número de puntos de fallo, la mayoría debidos a factores de ensayo. Es un criterio muy utilizado porque se ajusta muy bien a los resultados de fatiga con tensión media no nula.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{ut}} \right)^2 = 1$$



## Criterio de Goodman

Se describe mediante una línea recta que pasa por los puntos  $(0, S_e)$  y  $(\sigma_{ut}, 0)$ . La rotura después de  $N$  ciclos se produce cuando:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ut}} = 1$$

## Criterio de Soderberg

Como la anterior es una teoría lineal que previene los fallos por fluencia con comportamiento dúctil. Es una teoría que a pesar de prevenir estos fallos es demasiado conservadora y, por tanto, menos utilizada que la de Goodman.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{yt}} = 1$$

### 1.3.5 Daño acumulativo

#### Teoría de Palmgren Miner

La mayoría de situaciones reales no tienen un patrón continuo sino que están sometidos a estados de tensión variable con ciclos de distinta amplitud. Debido a su sencillez la teoría más utilizada para estos casos es la de Palmgren-Miner.

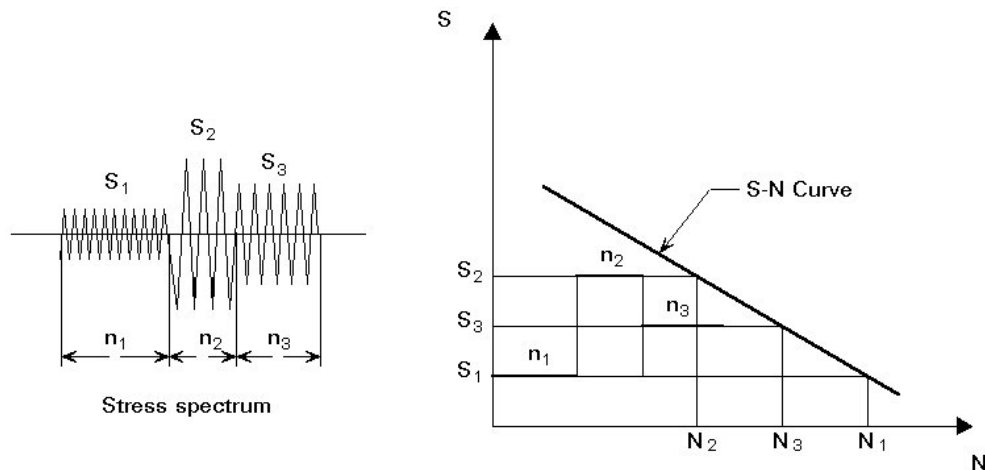


Ilustración 26 Representación esquemática del daño acumulativo

La teoría del daño acumulativo expone que cada ciclo de tensión causa un daño permanente sobre la pieza. La aplicación de  $n_i$  ciclos, con amplitudes  $\sigma_{mi}$  y  $\sigma_{ai}$ , consume una fracción  $d_i$  sobre la vida total de la pieza:

$$d_i = \frac{n_i}{N_i}$$

$N_i$  es la vida total a fatiga para dichos ciclos.

El fallo llegará cuando la suma de todas las fracciones llegue a 1:

$$\sum_i d_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \geq 1$$

### Modificación de Manson

A diferencia de la anterior esta modificación sí tiene en cuenta la secuencia de aplicación de las tensiones, es decir, el orden de los ciclos. En la práctica esta modificación no se aplica a no ser que sea a modo de comprobación de la regla de Miner.

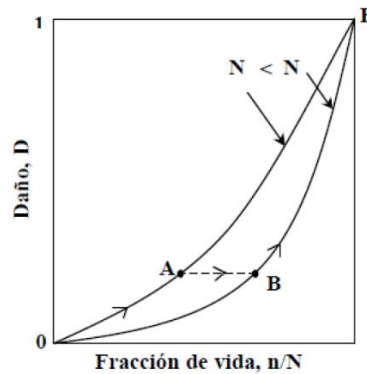


Ilustración 27 Curvas de daño de dos tensiones diferentes

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 MERCADO

La industria de la bicicleta ha evolucionado a pasos agigantados los últimos años y esto se refleja en el mercado. Hay infinidad de marcas y modelos para cada componente de la bicicleta ofreciendo al usuario múltiples posibilidades.

En este capítulo se mencionan algunas de las marcas más importantes de bielas de bicicleta de la actualidad y se profundiza en las tecnologías que emplean para conseguir los mejores resultados.

#### 2.1.1 Bielas Rotor (ALDHU)

Esta marca española ha conseguido hacerse un nombre en la industria ciclista gracias a sus constantes innovaciones.

Su despliegue internacional se produjo con el nacimiento de los platos ovalados Q-rings en 2006. El conjunto de platos, eje de pedalier y bielas eliminaban el punto muerto en el pedaleo mejorando significativamente el rendimiento. Los platos Q-rings, a diferencia de los anteriores modelos, no necesitan el cambio de bielas.

Los éxitos de Marianne Vos (una de las ciclistas femeninas más laureadas de la historia), o el logro de ganar las tres grandes (Tour en 2008 con Sastre, Vuelta en 2011 con Cobo y Giro d'Italia en 2012 con Hesjedal) dieron a la marca un gran reconocimiento en el ciclismo de carretera. Estos triunfos en ciclismo de carretera han hecho que en el presente el 90% de su facturación proviene de productos para carretera y el 10% de mountain bike.



Ilustración 28 Conjunto de platos Q-rings y bielas ALDHU. Rotor

En la actualidad, las bielas ALDHU son el máximo exponente en diseño y tecnología de la marca.

La tecnología de *posición óptima del plato* (OCP Mount) permite, gracias a su eje modular, ajustar la posición del plato ovalado Q RINGS en las bielas

ALDHU con incrementos de un grado. Esta solución permite configurar la OCP según la biomecánica individual del usuario y garantiza que la transferencia de la potencia máxima se produzca en el punto más óptimo de la pedalada.

Por otro lado su innovador *diseño modular* permite seleccionar cada componente de las bielas ALDHU para adaptarse a las especificaciones de cada usuario y bicicleta.

La integración en una pieza de los platos con la araña ha conseguido las bielas más ligeras jamás fabricadas (599 gramos – DM 50/34T). Gracias al mecanizado con Control Numérico por Ordenador (CNC) desde un bloque de aluminio se reduce el número de piezas. Esto se traduce en un incremento de la durabilidad y una reducción del mantenimiento, sin comprometer su rigidez en ningún momento.

El material para las bielas ALDHU es el aluminio 7055, derivado de la industria aeronáutica. Esta aleación de aluminio combina las propiedades físicas de la serie 7000 con una increíble resistencia a la fatiga. Además se aplica la avanzada tecnología Trinity Drilling System (TDS) que consiste en la perforación longitudinal de 3 agujeros en el brazo de la biela aligerándola más si cabe.

En resumen, con las bielas ALDHU se ha logrado una de las mejores relaciones entre peso y rigidez del mercado.

### 2.1.2 Shimano (HOLLOWTECH)

Shimano es una de las marcas más populares en la industria ciclista. Entre las tecnologías que incorpora para el sistema de transmisión destaca HOLLOWTECH, un brazo de biela hueco ultraligero creado con la propia tecnología de forja de la empresa y que mantiene la rigidez.

El añadido de la tecnología HOLLOWTECH II integra el eje pedalier con el brazo de biela derecho para lograr una mayor rigidez y ahorrar peso y, de este modo, obtener un alto equilibrio dimensional. El sistema de rodamiento de pedalier exterior proporciona una mejor distribución del peso y una mayor estabilidad de pedaleo, para lograr una transferencia más eficaz de la potencia.



Ilustración 29 Eje de pedalier integrado en la biela HOLLOWTECH II

Además, el juego de bielas HOLLOWTECH II tiene un sellado de alta precisión en el área de los rodamientos para aumentar la durabilidad y mantener un excelente rendimiento de giro durante largos periodos.

Tomando el juego de bielas en su conjunto, es esencial el equilibrio de la rigidez del brazo de biela, la rigidez del eje, la posición de los rodamientos y otras características.

De hecho, el juego de bielas se ha diseñado teniendo en cuenta el equilibrio total de esos elementos para evitar roturas.

Shimano es por tanto una gran alternativa en bielas de todas las gamas de calidad.

### 2.1.3 Full Speed Ahead (FSA)

FSA es también una gran marca en el sector ciclista. A continuación se exponen algunas de las tecnologías que se aplican a las bielas FSA.

Como en otras marcas FSA apuesta por conjuntos de eje pedalier, biela y plato modulares e intercambiables. Para la fabricación de bielas de aluminio se utiliza la tecnología Hollow Forged. De un único bloque de aluminio 7050-T6 se obtiene una biela hueca con una relación entre resistencia y peso superior.

En las bielas de carbono se practica la tecnología Hollow Carbon. Las bielas K-Force y SL-K están moldeadas utilizando una exclusiva tecnología de vejiga de aire para crear bielas que contienen dos cámaras largas y huecas separadas por una viga en I estructural. Las bielas huecas de FSA son verdaderas estructuras monocasco que proporcionan gran resistencia y peso ligero.



Ilustración 30 Sistema de transmisión FSA Gossamer

## 2.2 PATENTES

El campo de las patentes es amplio y variado. La búsqueda se ha realizado utilizando palabras clave en español y en inglés como: biela, crank arm, bicicleta, bicycle, sistema de transmisión, crankset...

De entre los muchos resultados que arrojaba esta búsqueda se han filtrado los más relacionados con el trabajo:

### *Pedal para bicicleta, con bielas extensibles (Fernando Irujo López) 2015*

Pedal para bicicleta, con bielas extensibles, en el que ambas bielas incorporan una extensión (4) que incorpora en el extremo un rodamiento para un eje (10) en el cual por el extremo exterior se fija el correspondiente pedal (7), mientras que por el extremo interior está unido axialmente en una excéntrica (9), en cuyo eje excéntrico (7) se acopla una segunda biela (6), la cual acopla en un punto (8) fijo de la biela principal (3), de forma que al girar el eje (10) del pedal se produce el desplazamiento de la extensión (4), alargando o acortando la longitud de la palanca de pedaleo formada por la biela (3) y su extensión (4) correspondiente, según se encuentre el pedal en posición de impulsión o de recobro, respectivamente.

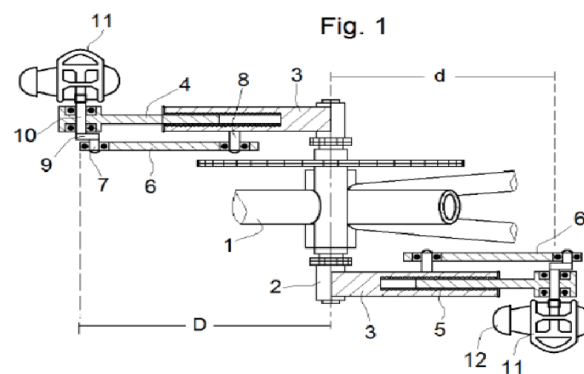


Fig. 2

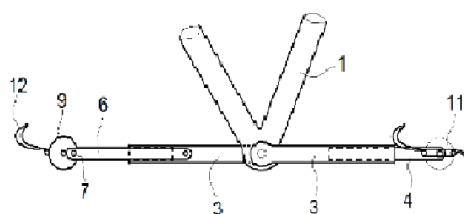


Fig. 3

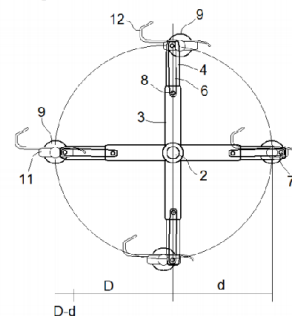
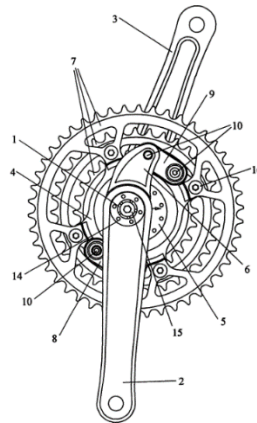


Ilustración 31 Planos biela bicicleta extensible 2015

### *Sistema de tracción por pedales mediante bielas independientes sin punto muerto (Pablo Carrasco Vergara, Rotor Componentes Tecnológicos SL) 2002*

Consiste en un sistema de pedaleo que hace uso de bielas independientes, de un plato de potencia - que gira en torno a un eje distanciado y paralelo al de pedalier - que va montado - vía rodamiento - sobre un soporte excéntrico fijable a la caja de pedalier, y de un brazo de transferencia que a través del eje de pedalier es solidario con la biela opuesta al lado de los platos: así el par se transmite desde la biela del lado de los platos y desde el brazo de transferencia mediante sendos empujadores conectados a puntos diametralmente opuestos del plato; durante el pedaleo, según baja cada pedal y la bicicleta va tomando inercia, el desarrollo relativo aumenta paulatinamente, y cuando el pedal se aproxima al final de su fase de descenso y va disminuyendo con rapidez la componente tangencial de la fuerza aplicada, es cuando la sollicitación de par decrece más rápidamente.



*Ilustración 32 Plano bielas independientes sin punto muerto*

### *Biela de bicicleta hueca (Frank Hermansen, Carl Winefordner) 2003*

Un brazo de manivela de bicicleta hueco tiene una parte tubular central para reducir el peso y dos porciones de saliente de montaje para montar un husillo de manivela y un pedal durante el uso. Una base de brazo de manivela está forjada o fundida con una parte posterior y laterales relativamente delgados, preferiblemente de aluminio o magnesio. La base del brazo de la biela tiene una sección transversal generalmente en forma de C. Una cubierta de brazo tiene una parte superior y lateral y está hecha de acero estampado o titanio. La cubierta se coloca sobre la base abierta del brazo de la biela para encerrar una sección hueca significativa. La cubierta del brazo estampado no requiere enhebrado ni soldadura. Se puede hacer usando un proceso de estampado muy económico. El brazo de la manivela puede fabricarse utilizando procesos de

fabricación tradicionales relativamente económicos, tales como la fundición a presión o la forja.

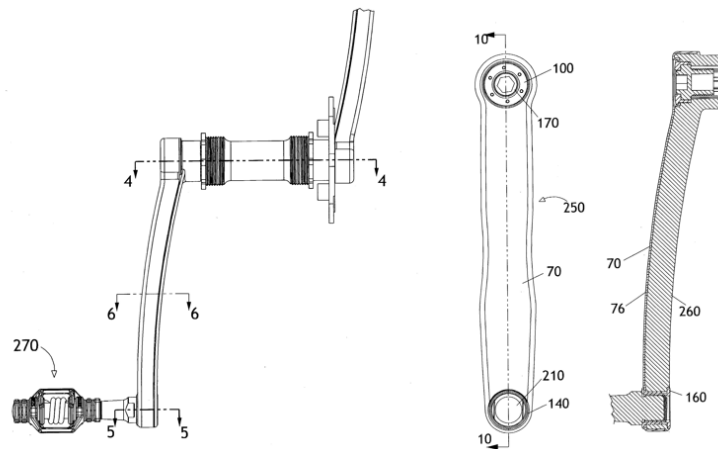


Ilustración 33 Planos ilustrativos biela hueca 2003

### Biela de bicicleta Shimano (Mitsutoshi Uchida, Masaaki Hara, Toru Iwai) 2004

Se proporciona un brazo de biela de bicicleta ligero, altamente resistente, altamente rígido y altamente diseñado en una forma compleja. El brazo de manivela de bicicleta tiene una porción de extremo de montaje de eje de cigüeñal, una parte de cuerpo de cigüeñal central y una porción de extremo de montaje de pedal. El brazo de manivela de bicicleta hueco es preferiblemente un miembro unitario de una pieza que se produce mediante un método de hidroformación de tubo. El brazo de manivela de bicicleta hueco tiene una parte de unión de eje de manivela situada dentro de la porción de extremo de montaje de eje de cigüeñal y una parte de fijación de husillo de pedal situada dentro de la porción de extremo de montaje de pedal. Las partes de extremo de montaje tienen un orificio de eje de cigüeñal y un orificio de husillo de pedal, respectivamente, con diámetros exteriores que son más pequeños que las partes de fijación, respectivamente.

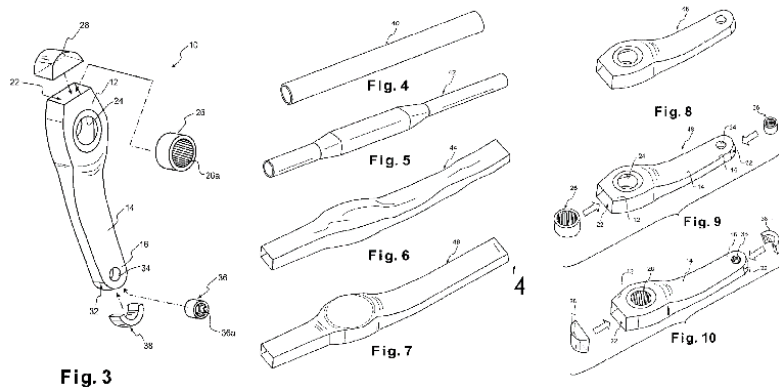


Ilustración 34 Algunos planos biela Shimano 2004



## 2.3 NORMATIVA

La normativa vigente referente a bicicletas es la UNE-EN ISO 4210, en la cual se detallan los requisitos de seguridad para bicicletas.

Más concretamente el apartado 8, UNE-EN ISO 4210-8:2015, se centra en los pedales y el sistema de transmisión de la bicicleta.

A continuación se presentan las pruebas de fatiga que ha de superar el sistema de transmisión para cumplir con la normativa.

Se especifican dos tipos de pruebas de fatiga para las bielas de la bicicleta: la primera prueba con las bielas a 45° respecto a la horizontal para simular las fuerzas debidas al pedaleo, y la segunda prueba con las bielas a 30° con la horizontal, para simular las fuerzas del ciclista de pie sobre los pedales durante el descenso (bicicletas de montaña). Las dos pruebas se realizan en conjuntos separados.

### 2.3.1 Método de prueba con las bielas a 45° respecto a la horizontal

Se fija el conjunto de los ejes del pedal, las dos bielas, el plato (o cualquier otro elemento de transmisión) y el eje de pedalier colocado sobre sus rodamientos, en un dispositivo de fijación equipado de rodamientos equivalentes a los de la caja de pedalier.

Se inclinan las bielas a 45 ° con respecto a la horizontal. Es obligatorio evitar la rotación del montaje poniendo una cadena alrededor del plato, que a la vez esté fijada correctamente a un soporte. Se actúa de igual forma para cualquier otro tipo de transmisión (por ejemplo, transmisión por correa o árbol), bloqueando la primera etapa.

Se permite colocar la biela izquierda en cualquier posición de las dos mostradas en la imagen 35, con la condición de que la fuerza se aplique en la dirección apropiada, como se indica en el apartado siguiente.

#### Fase 1

Aplicar fuerzas  $F_2$  dinámicas verticales y repetidas alternativamente a los ejes del pedal a una distancia de 65 mm con la cara externa de la biela como se muestra en la Tabla 4 y la Imagen 35 para los ciclos de prueba C (donde un ciclo de prueba consiste en la aplicación de dos fuerzas). El sentido de aplicación de la fuerza debe ser descendente sobre la biela derecha y ascendente sobre la izquierda para bielas rígidas hacia atrás o descendente para bielas rígidas hacia adelante. Durante la aplicación de estas fuerzas, asegurar que la fuerza sobre el eje del pedal descienda al 5% o menos de la fuerza máxima antes de comenzar

a aplicar la fuerza de ensayo al otro pedal. La frecuencia máxima de prueba será de 10 Hz.

### Fase 2

Con el mismo montaje que en la fase 1 de prueba se aumentan los valores de la fuerza  $F_2$  y se disminuye el número de ciclos. Como en la anterior fase hay que asegurarse que la fuerza sobre el eje del pedal descienda al 5% o menos de la fuerza máxima antes de comenzar a aplicar la fuerza de ensayo al otro pedal. La frecuencia máxima de prueba se mantendrá en 10 Hz.

Tipo de bicicleta		Bicicletas de ciudad y trekking	Bicicletas joven adulto	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carretera
Fuerza $F_2$	Fase 1	1300	1300	1800	1800
	Fase 2	1400	1400	1900	1900
Ensayo ciclos C	Fase 1	120000	120000	60000	120000
	Fase 2	100000	100000	50000	100000

Tabla 4 Fuerzas y ciclos de ensayo para distintos tipos de bicicleta

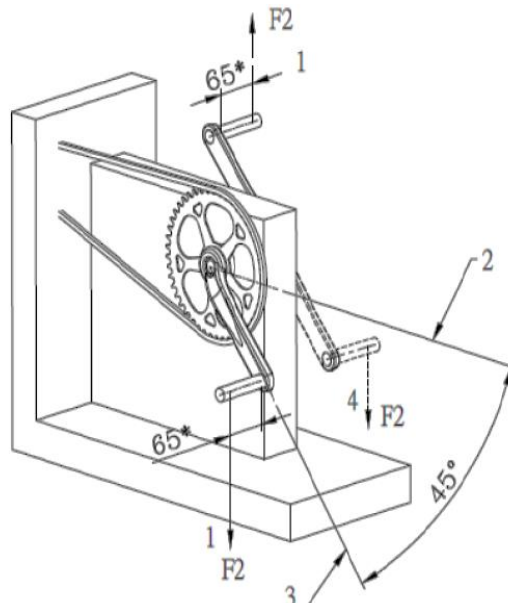


Ilustración 35 Ensayo de fatiga con pedales a 45°

### 2.3.2 Método de prueba con las bielas a 30° respecto a la horizontal

Este método de prueba está enfocado en las bicicletas de montaña.

Se fija el conjunto de los ejes del pedal, las dos bielas, el plato (o cualquier otro elemento de transmisión) y el eje de pedalier colocado sobre sus rodamientos, en un dispositivo de fijación equipado de rodamientos equivalentes a los de la caja de pedalier.

Se fija la biela izquierda a la base de la máquina de ensayo como se aprecia en la Imagen 36.

#### Fase 1

Se aplica una fuerza dinámica repetida, verticalmente hacia abajo, de 1800 N al eje del pedal a una distancia de 65 mm de la cara externa de la biela durante 60000 ciclos.

La frecuencia máxima de prueba será de 10 Hz.

#### Fase 2

Se aplica una fuerza dinámica repetida, verticalmente hacia abajo, de 1900 N al eje del pedal a una distancia de 65 mm de la cara externa de la biela durante 50000 ciclos.

La frecuencia máxima de prueba se mantendrá en 10 Hz.

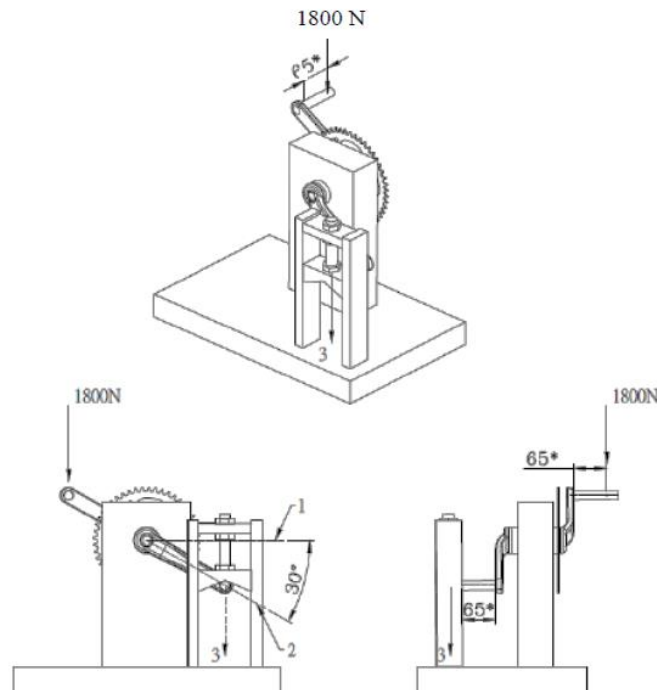


Ilustración 36 Ensayo de fatiga con pedales a 30° (bicicletas de montaña)

### 3 MODELIZACIÓN DEL CONJUNTO CON SOLIDWORKS

Tener un buen modelo sobre el que trabajar es una de las partes fundamentales a la hora de estudiar el comportamiento de una pieza. Al fin y al cabo un buen trabajo de Diseño Asistido por Ordenador es un gran sustento para los futuros ensayos que se realizan sobre él.

En este caso, para comenzar, se ha realizado una gran búsqueda de información con el fin de crear un modelo de pieza acorde a los diseños del mercado actual.

Como es lógico, los grandes fabricantes en la industria de la bicicleta no proporcionan información detallada de sus productos: planos de diseño, procesos de mecanizado, materiales... En su lugar ofrecen una información más genérica enfocada a un posible comprador.

Ante este inconveniente, se planteaban dos formas de resolverlo. La primera consistía en tomar las medidas de un conjunto de pedales, biela y eje pedalier y plasmarlas en el programa de CAD. La segunda opción era crear un modelo propio basado en las medidas genéricas que suelen tener este tipo de piezas. Finalmente se ha optado por la segunda.

El programa elegido ha sido Solidworks, una herramienta para modelado mecánico en 2D y 3D. Este programa es muy completo ya que además del diseño de piezas incluye diversos módulos de Ingeniería Asistida por Ordenador para estudiarlas. Este es un gran punto a favor de Solidworks porque con otros programas hay que crear primero el modelo de pieza y después importarlo a otro programa para estudiarlo.

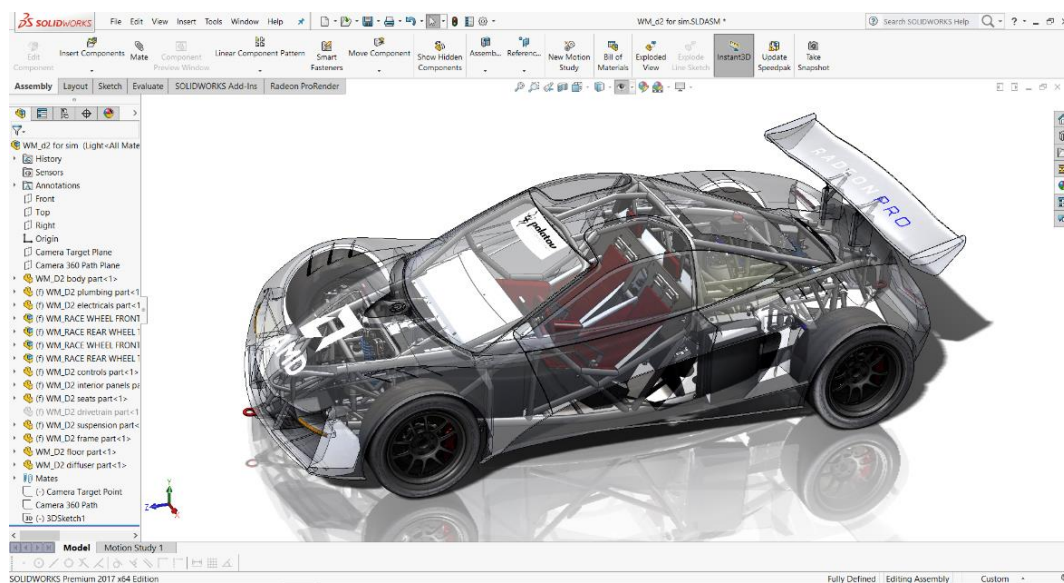


Ilustración 37 Diseño hecho con Solidworks

### 3.1 Diseño biela

El punto de partida ha sido la creación de la biela derecha de una bicicleta. Gran parte del esfuerzo de diseño se ha centrado en este elemento ya que va a ser fruto del análisis más adelante.

La longitud de biela elegida ha sido de 175 mm, una medida muy utilizada en el mercado. Ésta se mide desde el centro del eje del pedalier hasta el centro del eje del pedal.

La anchura de la biela generalmente va desde los 10 a los 20 mm. En este caso no tiene un valor fijo ya que se le ha dado curvatura y en la zona más cercana al eje pedalier es más ancha que en la cercanía del pedal.

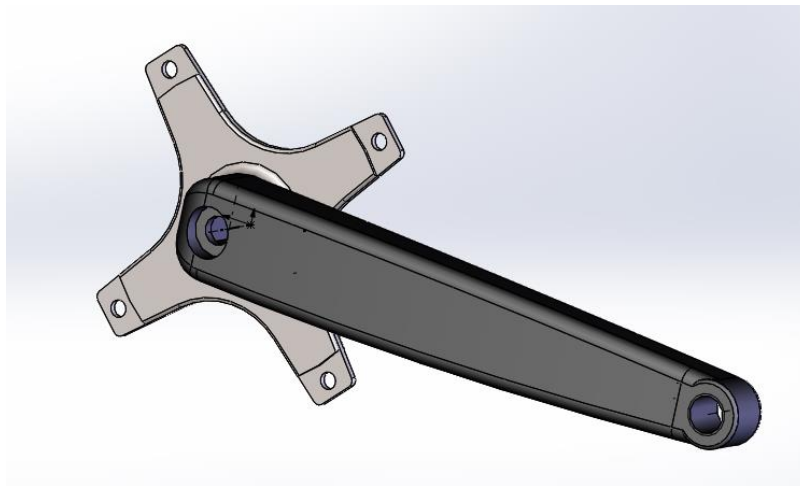


Ilustración 38 Biela derecha bicicleta

Una de las máximas que se han tenido en cuenta ha sido la de redondear las aristas vivas que se crearan, con el fin de uniformizar la superficie de la pieza. Esa idea está basada en el patrón de diseño que siguen las bielas de grandes marcas como Shimano, Campagnolo, Rotor, Sram...

Se ha realizado también un vaciado o rebaje de material de la zona intermedia de la biela con el fin de aligerar peso, otra de las máximas en el diseño de estos elementos. Evidentemente esto puede generar más puntos de concentración de tensiones pero es un riesgo que se asume en el diseño. En ese punto toma cariz el rediseño de las piezas hasta la consecución de un modelo final.

La unión con el eje del pedal se realiza mediante una rosca de métrica 12 mm.

También se ha ejecutado un vaciado en forma de prisma en la que encajará el eje pedalier de cuadradillo.

La araña del modelo está basada en el diseño de las series Altus y Acera de Shimano como se aprecia en la siguiente imagen:



Ilustración 39 Bielas Shimano Acera y Altus

### 3.2 Diseño eje pedalier

Este eje pedalier de cuadradillo es uno de los más simples del mercado. En este tipo de pedalier el eje y los rodamientos forman un solo componente, los últimos están sellados.

La longitud de eje que se ha tomado ha sido de 107 mm y la longitud de la caja de pedalier en este caso es de 73 mm. El diámetro máximo del eje es de 36mm.

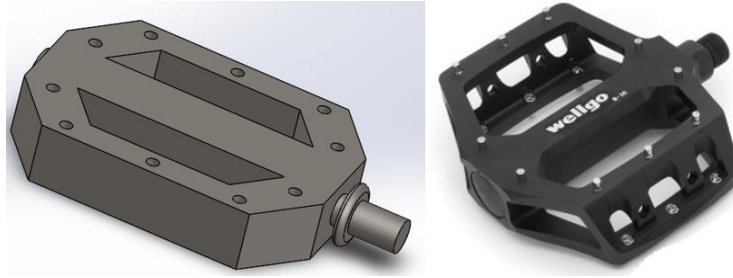


Ilustración 40 Eje pedalier de cuadradillo. Modelo vs eje Shimano

Hay que destacar que la zona roscada en el ensamblaje final se ha tenido que retirar ya que provocaba problemas en el mallado.

### 3.3 Diseño pedal

Se ha utilizado un diseño básico de pedal de plataforma como el que se muestra en la siguiente figura. Tanto las medidas del pedal como las de las anteriores piezas se pueden consultar en los planos que se adjuntan en el apéndice A.



*Ilustración 41 Pedal modelo vs real*

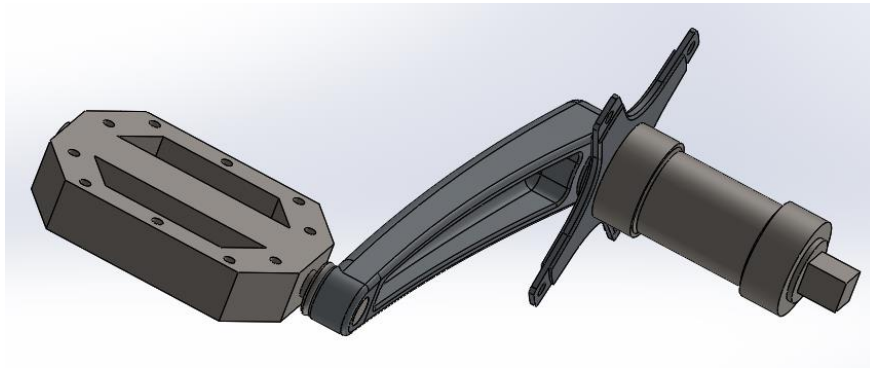
### 3.4 Ensamblaje

Se han importado todas las piezas en un nuevo archivo de ensamblaje.

Las uniones se basan en distintas correlaciones como pueden ser:

- Coaxialidad del eje del pedal con el agujero de la biela.
- Coincidencia del macho del eje del cuadradillo con la hembra de la biela.
- Paralelismo de caras de los diferentes sólidos.

Con todas estas correlaciones se consigue un conjunto muy similar al real.



*Ilustración 42 Ensamblaje pedal, biela y eje de pedalier*

Los materiales de todas las piezas no se describen hasta los ensayos ya que estos van a variar.



## 4 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DE FATIGA CON SOLIDWORKS SIMULATION

### 4.1 Introducción a Solidworks Simulation

Como se ha visto anteriormente, Solidworks es un programa muy utilizado y recomendado para la modelización mecánica de piezas en 3D. Entre la gran variedad de módulos que presenta destaca Solidworks Simulation, una herramienta de CAE, que cuenta con los siguientes tipos de estudios:

- Análisis estático
- Estudio de frecuencia
- Estudio de tipología
- Estudio de diseño
- Térmico
- Pandeo
- Fatiga
- Submodelado
- Caída
- Diseño de recipiente a presión

De todas estas opciones, el presente trabajo se centrará en el análisis estático y a fatiga de la biela anteriormente modelada.

### 4.2 Método de Elementos Finitos

Los estudios que realizan estos programas de CAE utilizan por regla general el Método de Elementos Finitos (MEF). Es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas, el cual está enfocado en la solución de diversos problemas en el campo de la ingeniería.

Permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados elementos finitos. Cuanto mayor sea el número de elementos finitos del modelo, más se aproximará al sistema real y la solución del modelo, de igual manera, a la solución del sistema real.

### 4.3 Mallado

El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.

El tipo de mallado y sus propiedades es una de las partes más importantes del análisis.

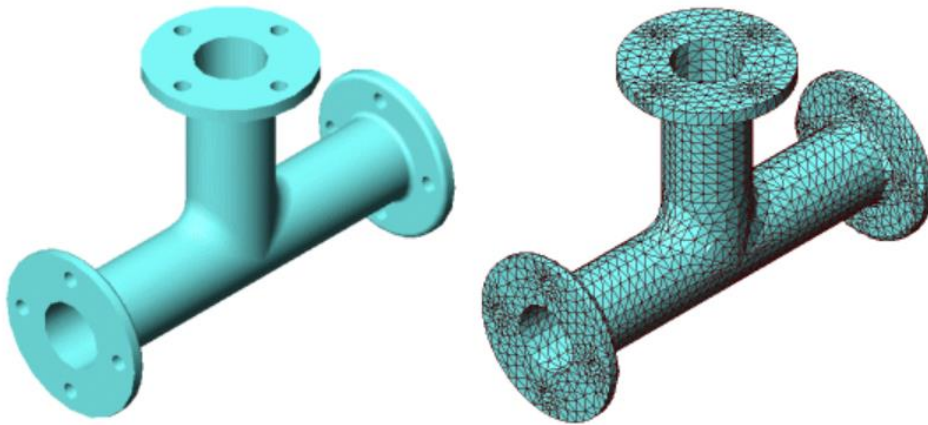


Ilustración 43 Modelo CAD y modelo mallado con elementos tetraédricos

A continuación se muestran los diferentes tipos de mallas que utiliza Solidworks.

#### 4.3.1 Malla sólida

El programa crea una malla sólida con elementos sólidos tetraédricos 3D para todos los elementos sólidos de la carpeta Piezas. Los elementos tetraédricos son apropiados para objetos de gran tamaño.

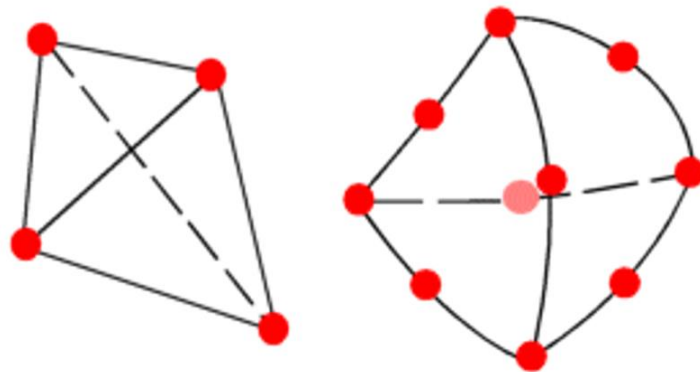


Ilustración 44 Elemento sólido lineal y elemento sólido parabólico

### 4.3.2 Malla de vaciado

El programa crea automáticamente una malla de vaciado para chapas metálicas con espesor uniforme (excepto en el estudio de caída) y geometrías de la superficie. Para las chapas metálicas, la malla se crea automáticamente en la superficie media. El programa extrae el espesor de vaciado a partir del espesor de la chapa metálica.

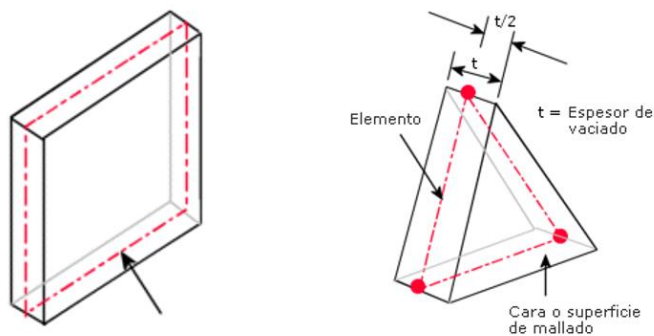


Ilustración 45 Ejemplos de malla de vaciado

### 4.3.3 Malla de viga

El programa utiliza automáticamente una malla de viga e identifica juntas para miembros estructurales que se tocan o interfieren y miembros estructurales que no se tocan dentro de una cierta distancia (tolerancia). Un elemento de viga es un elemento de línea definido por dos puntos finales y una sección transversal. Los elementos de viga pueden resistir cargas axiales, de flexión, cortantes y de torsión. Las cabezas de armadura sólo resisten cargas axiales. Si se usa con piezas soldadas, el software define las propiedades transversales y detecta las juntas.

### 4.3.4 Malla mixta

El programa utiliza automáticamente una malla mixta cuando hay diferentes geometrías en el modelo.

## 4.4 Análisis estático

Para realizar el análisis estático lineal se deben definir unos parámetros de entrada que se detallan a continuación.

### 4.4.1 Sujeciones

Son las restricciones necesarias para evitar el movimiento de un sólido rígido.

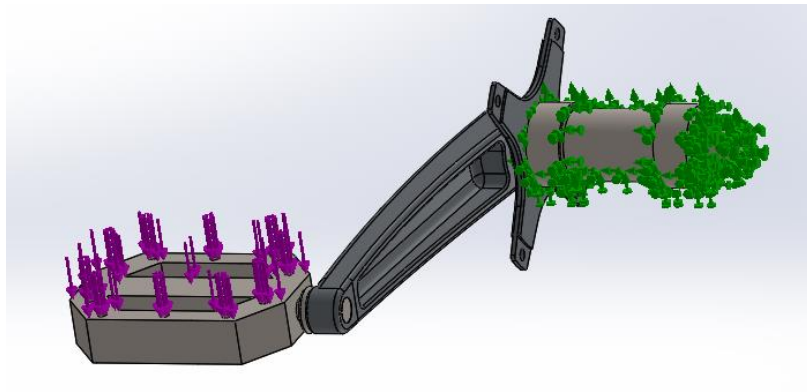


Ilustración 46 Sujeciones y cargas de la pieza

### 4.4.2 Cargas

Al menos uno de los tipos de carga siguientes:

- Fuerzas concentradas
- Presión
- Desplazamientos prescritos distintos de cero
- Fuerzas del sólido (gravitacionales y/o centrífugas)
- Térmicas (defina temperaturas u obtenga un perfil de temperatura a partir del análisis térmico)
- Cargas importadas desde SOLIDWORKS Motion
- Temperatura y presión importadas desde Flow Simulation

#### 4.4.3 Propiedades del material

Como es lógico es necesario seleccionar el material de la pieza que se va a ensayar. La biblioteca de Solidworks es muy amplia en este sentido y cuenta con muchos materiales, pero en el caso de que el material del ensayo no esté, se pueden introducir los parámetros característicos manualmente.

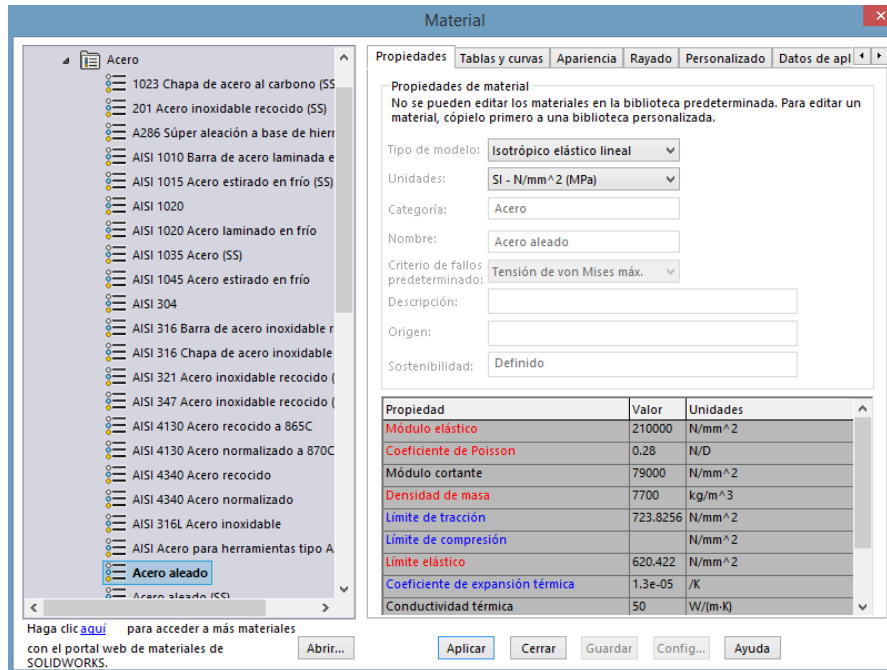


Ilustración 47 Biblioteca de materiales Solidworks

#### 4.4.4 Modelo de mallado

La malla generalmente depende de los siguientes factores:

- La geometría creada para el mallado.
- Opciones de mallado activas del estudio.
- Especificaciones de Control de malla.
- Opciones de conexión para contacto
- Tamaño y tolerancia de elementos globales

Hay que tener en cuenta que cada cambio en el modelo, condiciones de contacto o las opciones de mallado, obliga a un nuevo mallado.

#### 4.4.5 Resultados del análisis estático

Una vez ejecutado el estudio estático se obtiene una carpeta de resultados en la que se incluyen:

## Tensiones

El programa tiene múltiples opciones para el estudio tensional: tensión de Von Mises, tensión normal en X, Y y Z, tensiones principales 1, 2, y 3, tensiones cortantes...

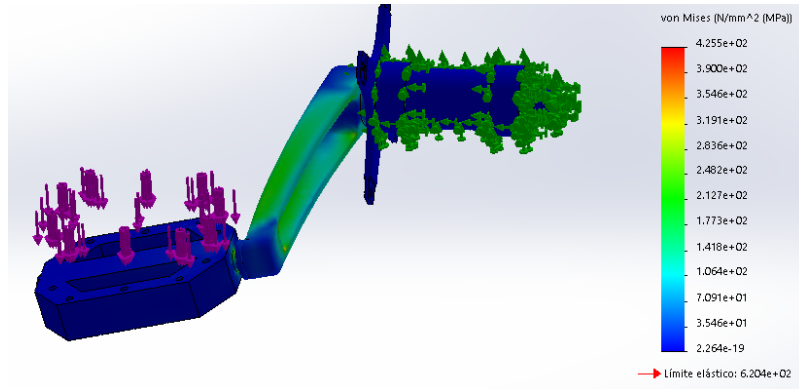


Ilustración 48 Resultado tensiones Von Mises

## Desplazamientos

Al igual que en el caso de las tensiones el programa calcula: desplazamientos resultantes, fuerzas y desplazamientos en los ejes X, Y, Z...

## Deformaciones unitarias

Finalmente se obtienen las deformaciones unitarias. Adicionalmente se puede ver la deformación mediante una pequeña animación.

## 4.5 Análisis de fatiga

### 4.5.1 Definiciones de fatiga

Las definiciones de fatiga que utiliza el programa son idénticas a las explicadas previamente en los fundamentos de la fatiga. De hecho, en la ayuda que tiene el programa, se describen muchos de estos términos y es una herramienta muy útil para consultar dudas de concepto.

#### 4.5.2 Requerimientos para realizar un análisis de fatiga

Para poder realizar un estudio de fatiga con éxito se deben cumplir los siguientes requerimientos:

- En primer lugar hay que crear como mínimo un análisis estático. En él se definen las condiciones de contorno, como pueden ser las sujeciones y las fuerzas aplicadas, y se resuelve obteniendo los resultados de tensiones.
- A continuación se especifican uno o varios sucesos de fatiga usando como base los análisis estáticos previos.
- El software tiene una gran biblioteca de materiales, en la que se incluyen, por ejemplo, curvas S-N que son imprescindibles para este análisis. En el caso de que el material que se elija no tenga estas curvas se pueden introducir manualmente. Este proceso se explicará más adelante.

#### 4.5.3 Ingreso de sucesos

Habiendo creado y resuelto el estudio estático se deben especificar las condiciones de este ensayo de fatiga:

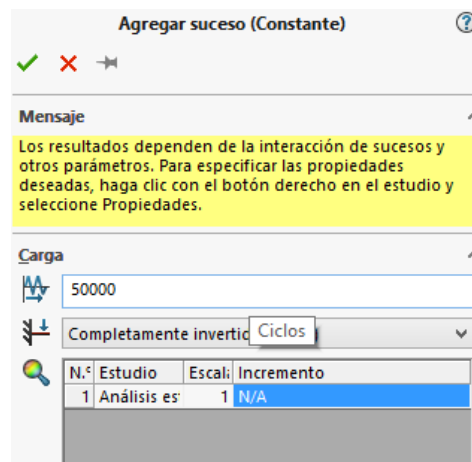
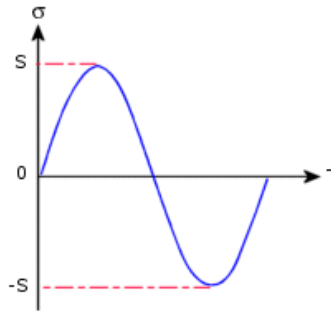


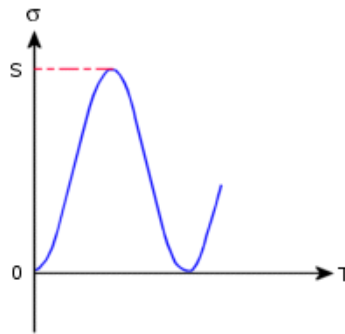
Ilustración 49 Ventana sucesos fatiga

- Ciclos: se introduce el número de ciclos a ensayar.
- Tipo de carga: depende del factor de carga  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ .

- Completamente invertida ( $R=-1$ ): la tensión media es nula ya que el valor absoluto de la tensión máxima y mínima es el mismo  $|\sigma_{\min}| = |\sigma_{\max}|$ .


Ilustración 50 Carga completamente invertida  $R=-1$ 

- Basada en cero ( $R=0$ ): la tensión máxima o mínima es cero, lo que significa que los valores absolutos de la tensión media y la tensión alterna son iguales.


Ilustración 51 Carga de tracción  $R=0$ 

- Relación de carga  $R$ : se introduce el valor manualmente. El suceso de fatiga se basa en un estudio de referencia. Cada carga y, por lo tanto, cada componente de tensión del estudio de referencia cambia su magnitud proporcionalmente desde su valor máximo  $\sigma_{\max}$  hasta un valor mínimo definido por  $R \cdot \sigma_{\max}$ , donde  $R$  es el factor de carga. Una relación negativa indica inversión de la dirección de carga.

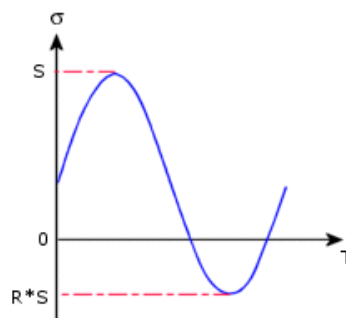


Ilustración 52 Carga en función de la relación de carga



- Buscar picos del ciclo: esta opción se utiliza cuando hay diferentes casos de carga. El programa calcula las tensiones alternas de cada nodo considerando la combinación de picos de cargas de fatiga diferentes. A continuación, determina la combinación de cargas que produce la fluctuación de tensión mayor. Las cargas de fatiga pueden hacer referencia a uno o más estudios estáticos.
- Asociación de estudios: establece los estudios de referencia:
  - N° (número): es el contador de estudios que tiene como límite máximo 40 casos de carga.
  - Estudio: se instituye el estudio de referencia de la configuración que esté activa.
  - Escala: si el estudio es lineal el programa permite utilizar este factor para aplicar la escala a las tensiones.
  - Paso: configura el paso de solución para el estudio de referencia no lineal o dinámico lineal.

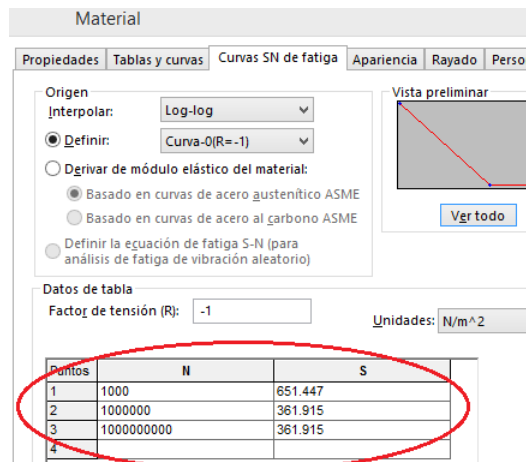
#### 4.5.4 Curvas S-N

Para finalizar la definición de las condiciones de contorno del ensayo a fatiga se debe introducir la curva S-N del material.

En algunos materiales de la biblioteca de Solidworks esta curva ya viene por defecto cuando el nombre del material tiene una terminación SN. Aquellos materiales con terminación SS contienen curvas de tensión-deformación unitaria.

Otra opción sería derivando el módulo elástico del material. El software se basa en las curvas S-N de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) para el acero austenítico o el acero al carbono y los módulos de elasticidad del material activo.

Finalmente se puede optar por definir la ecuación de fatiga S-N manualmente introduciendo puntos de tensión y número de ciclos.



Material

Propiedades Tablas y curvas Curvas SN de fatiga Apariencia Rayado Person

Origen  
Interpolación: Log-log  
Definir: Curva-0(R=-1)  
Derivar de módulo elástico del material:  
☒ Basado en curvas de acero austenítico ASME  
☐ Basado en curvas de acero al carbono ASME  
☐ Definir la ecuación de fatiga S-N (para análisis de fatiga de vibración aleatorio)

Vista preliminar

Ver todo

Datos de tabla  
Factor de tensión (R): -1 Unidades: N/m<sup>2</sup>

Puntos	N	S
1	1000	651.447
2	1000000	361.915
3	1000000000	361.915
4		

Ilustración 53 Introducción manual curva S-N

#### 4.5.5 Propiedades del análisis a fatiga

Mediante la pestaña opciones se establecen las opciones del estudio de fatiga activo. Se pueden definir estudios con sucesos de amplitud constante o variable pero nunca se pueden mezclar ambos.

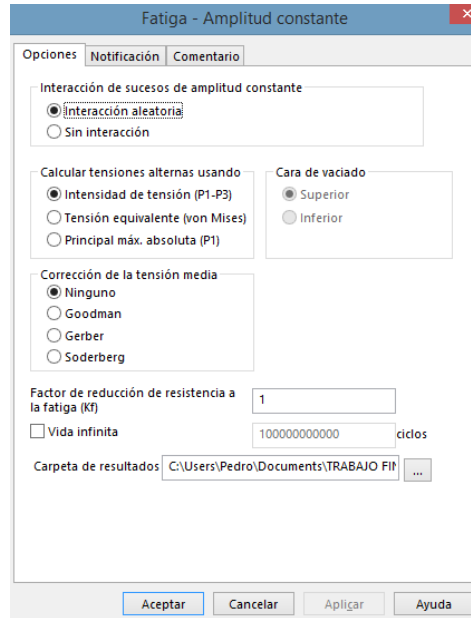


Ilustración 54 Propiedades del análisis a fatiga

- Interacción de sucesos de amplitud constante:
  - Interacción aleatoria: el software considera la posibilidad de mezclar tensiones pico de diferentes sucesos para la evaluación de tensiones alternas. Esta opción es significativa sólo si se define más de un suceso de fatiga.
  - Sin interacción: el software supone que los sucesos se producen de manera secuencial uno después del otro sin ninguna interacción.
- Cálculo de las tensiones alternas: establece el tipo de tensión necesaria para calcular las tensiones alternas equivalentes que serán utilizadas para extraer la cantidad de ciclos a partir de la curva S-N.
  - Intensidad de tensión (P1-P3): es la diferencia entre la primera tensión principal y la tercera tensión principal.
  - Tensión equivalente (von Mises): también conocida como la teoría de la máxima energía de distorsión.
  - Principal máx. absoluta (P1): se calcula con la primera tensión principal.

- Corrección de la tensión media:
  - Sin corrección.
  - Método de Goodman: para materiales frágiles.
  - Método de Gerber: para materiales dúctiles.
  - Método de Soderberg: el más conservador.
- Opciones adicionales:
  - Factor de reducción de resistencia a la fatiga ( $k_f$ ): este factor, entre 0 y 1, sirve para marcar diferencias entre el entorno de prueba empleado para generar la curva S-N y el entorno de carga real. Al aplicar este factor se reduce el número de ciclos que causan fallos a determinada tensión alterna. Su valor se saca de manuales de fatiga.

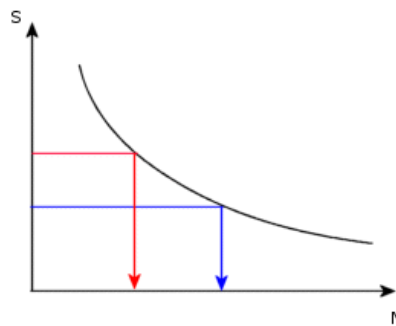


Ilustración 55 En rojo aplicado el factor y en azul sin aplicar

- Vida infinita: el número de ciclos que serán utilizados cuando la tensión alterna corregida sea menor que el límite de resistencia. Este número se usa en lugar del número de ciclos asociado con el último punto de una curva S-N.

#### 4.5.6 Resultados análisis de fatiga

Se procede a ejecutar el estudio de fatiga obteniéndose una carpeta de resultados en la que se incluyen los siguientes conceptos:

## Daño

Muestra el porcentaje de vida de la estructura consumido por los sucesos de fatiga previamente definidos.

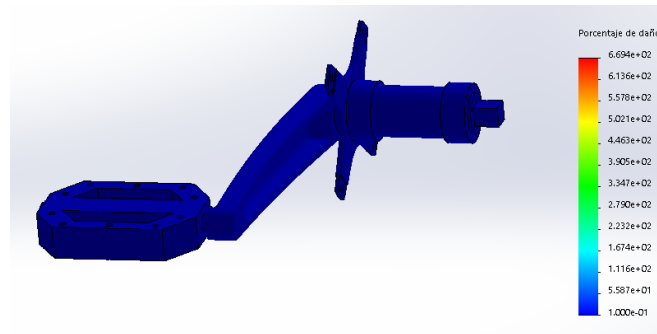


Ilustración 56 Porcentaje de daño

## Vida

Únicamente disponible cuando el estudio de fatiga es definido con un sólo suceso.

Su trazado se basa en las curvas SN y en la tensión alterna de cada ubicación, mostrando el número de ciclos (para estudios de sucesos de amplitud constante) o el número de bloques (para estudios de amplitud variable) que causan fallos de fatiga para cada ubicación.

En este caso es interesante invertir los colores del resultado para destacar aquellas partes de la pieza con menor esperanza de vida.

## Factor de carga

No se genera automáticamente al ejecutar el estudio pero yendo a las opciones se puede generar. Del mismo modo que la vida, está disponible sólo cuando el estudio de fatiga es definido con un sólo suceso.

Si el valor en algún punto es menor de 1 significará que ahí se producirá el fallo. Un factor de carga de seguridad de 3,5 en la ubicación indica que el suceso de fatiga definido ocasionará un fallo de fatiga en esta ubicación si se multiplican por 3,5 todas las cargas definidas para el estudio estático.

## Biaxialidad

Traza la relación entre la tensión alterna menor entre la mayor. Un valor de -1 indica estado cortante puro y un valor de 1 indica estado biaxial puro.

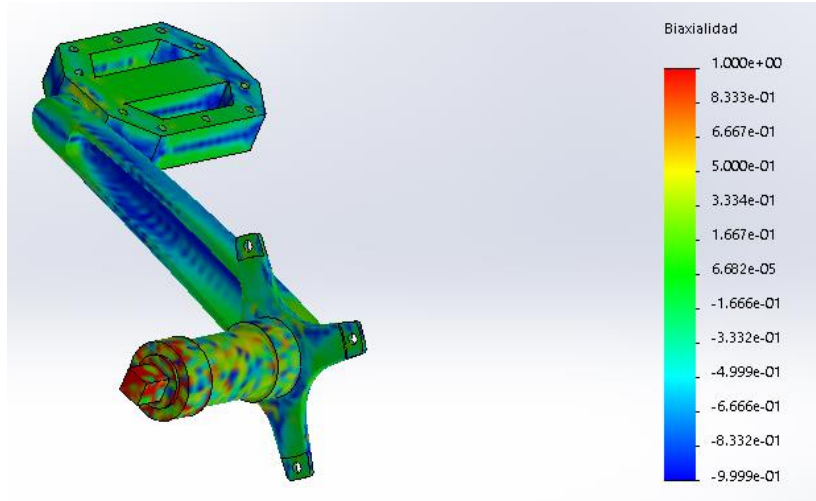


Ilustración 57 Resultado de biaxialidad

## 5 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DE FATIGA DE UNA BIELA DE BICICLETA

Mediante los siguientes estudios se pretende conocer el comportamiento tensional y a fatiga de la biela de bicicleta modelizada.

El ensayo consiste en la aplicación de una fuerza de 1000 N sobre el pedal durante  $10^6$  ciclos hasta que se produzca el fallo de la biela. La elección de estos parámetros está relacionada con la normativa sobre seguridad de bielas anteriormente citada. Los materiales que se van a utilizar son: acero aleado, aluminio 7075-T6 y titanio Ti-6Al-4V.

### 5.1 Estudio 1. Biela de acero aleado

El primero de los casos prácticos se ensaya con un conjunto de biela, eje pedalier y pedal de acero aleado. Este material es uno de los más utilizados en la fabricación de componentes de bicicleta debido a sus grandes prestaciones mecánicas y un precio competitivo.

#### 5.1.1 Análisis estático

Mediante la siguiente imagen se muestran las propiedades mecánicas que recoge Solidworks en su biblioteca de materiales para el acero aleado.

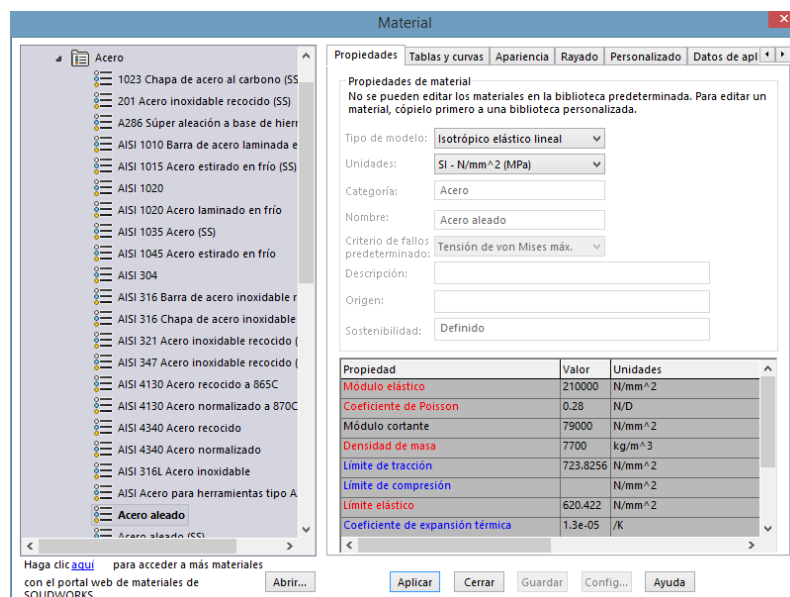


Ilustración 58 Propiedades del acero aleado

Entre ellas cabe destacar la tensión última a tracción y la tensión de fluencia:

$$\sigma_{ut} = 723,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yt} = 620,42 \text{ MPa}$$

También es importante fijarse en la densidad de masa, ya que los dos pilares fundamentales para el diseño de este tipo de piezas son la rigidez y la ligereza. Su valor es  $\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$ .

Una vez definido el material de la pieza a ensayar se definen las condiciones y sucesos a las que estará sometida. El análisis de fatiga se basa en un único suceso de carga de valor 1000 N y repetido durante 1000000 ciclos.

La fuerza concentrada se aplica a lo largo de la superficie del pedal en sentido vertical descendente. Las partes que se mantienen fijas corresponden al eje pedalier de la bicicleta. En la siguiente imagen se puede observar esta configuración:

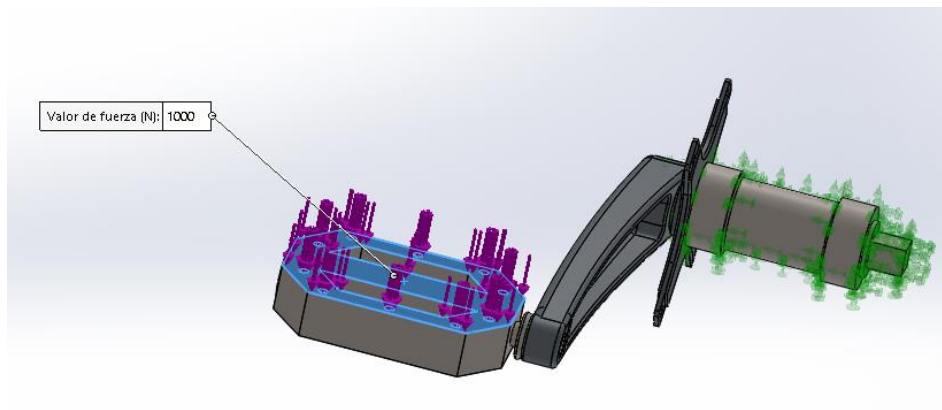


Ilustración 59 Fuerzas y sujeciones en la biela de acero aleado

A continuación se ha realizado el mallado más fino que la herramienta disponía con el objetivo de definir correctamente las zonas más complejas de la pieza.

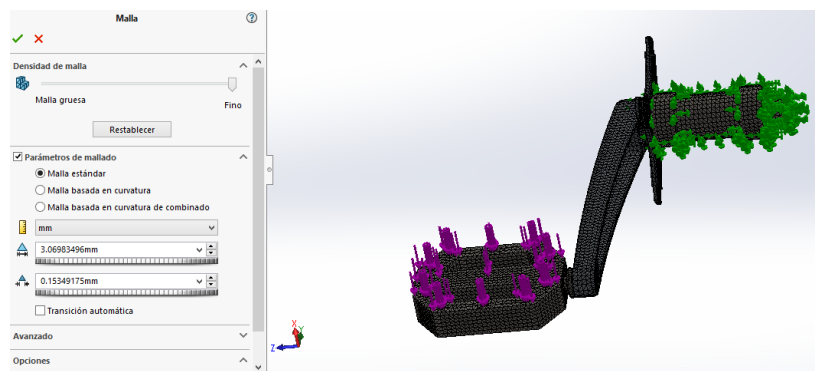


Ilustración 60 Mallado fino acero aleado

Una vez definidas todas estas condiciones se procede a resolver el análisis arrojando los siguientes resultados:

### Tensión de Von Mises

Los valores máximos no superan en ningún caso el valor de tensión de fluencia del material.

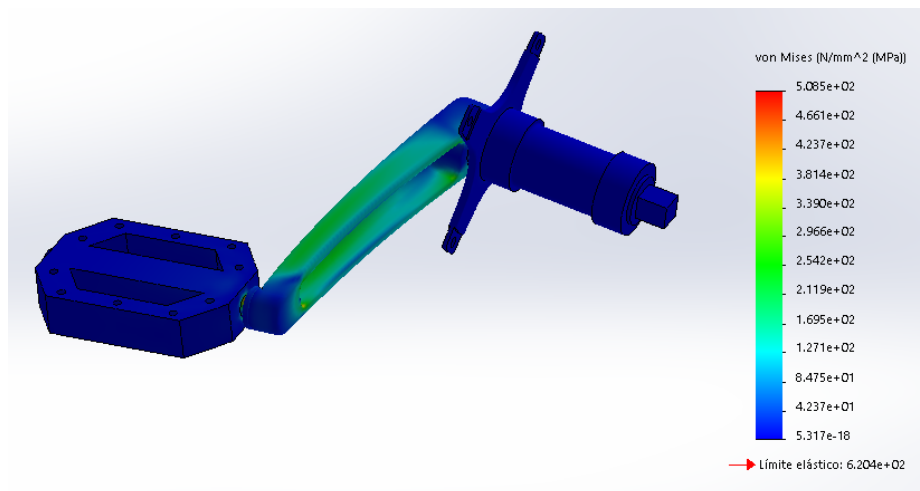


Ilustración 61 Tensiones acero aleado

Como se observa en la imagen la zona intermedia de la biela sufre mayores tensiones, concretamente en la zona donde se ha rebajado el material.

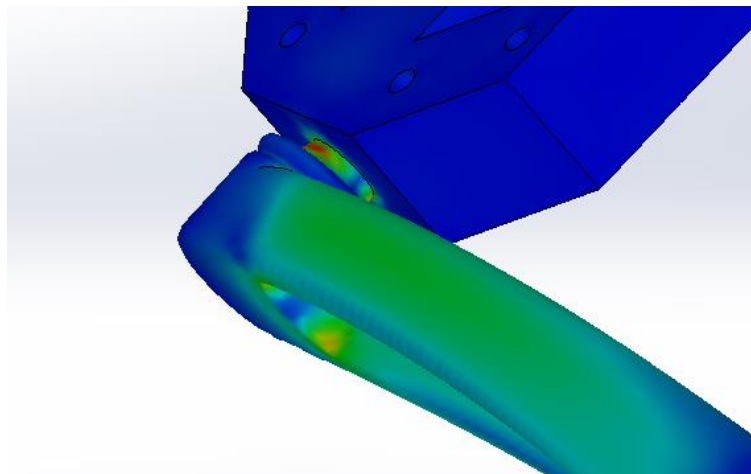


Ilustración 62 Puntos concentración de tensiones en biela y pedal de acero

Como ya se había comentado anteriormente estas geometrías suelen ser las más propensas a concentrar tensiones. El valor máximo de tensión del conjunto se sitúa en el eje que une la biela con el pedal.



Para conocer el valor máximo de tensión en la biela basta con identificar los valores en los puntos de concentración de tensiones.

$$\sigma_{\text{máx}} = 4,007 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

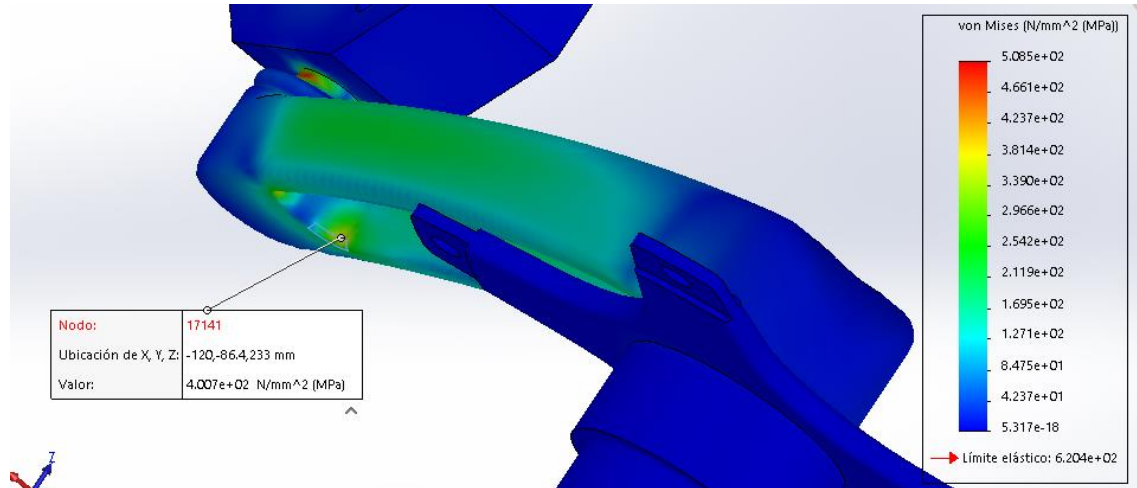


Ilustración 63 Máxima tensión Von Mises en la biela de acero aleado

### Deformaciones unitarias

El trazado de la deformación unitaria para el acero aleado quedaría de la siguiente forma:

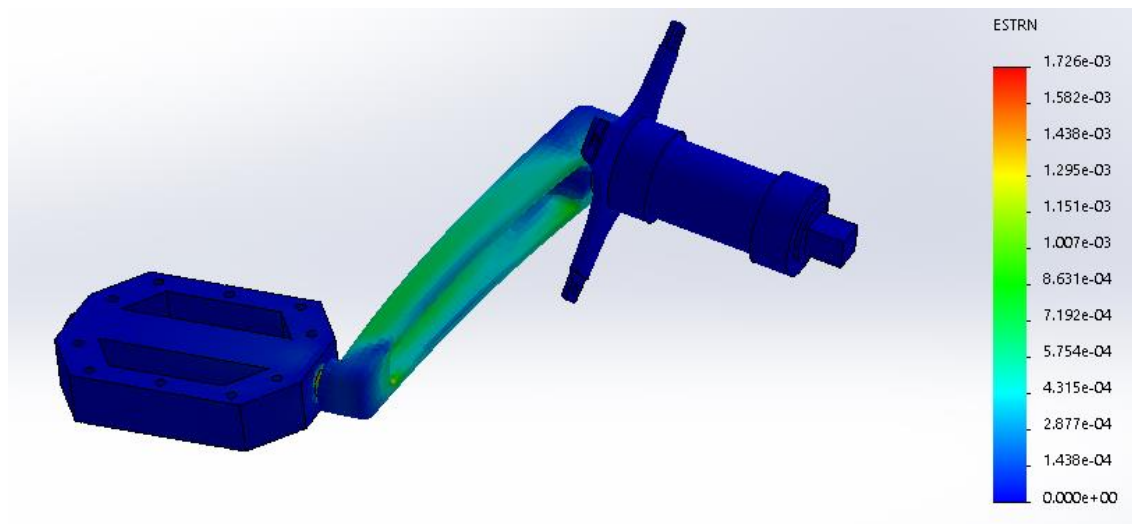


Ilustración 64 Deformaciones en la biela de acero aleado

Encontrando el máximo valor de deformación unitaria de la biela en la misma región de la máxima tensión de Von Mises. Su valor es de  $1,240 \cdot 10^{-3}$  en el elemento 6464.

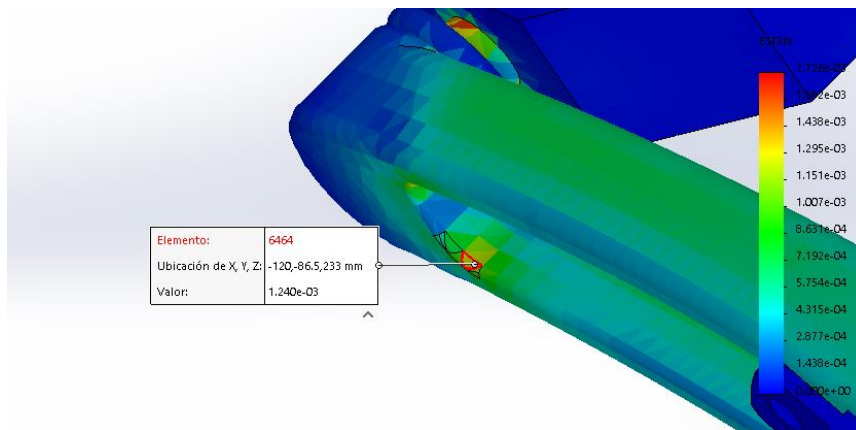


Ilustración 65 Máxima deformación unitaria en la biela de acero aleado

### 5.1.2 Análisis de fatiga

Se comienza cargando el suceso para acero aleado con las siguientes opciones:

- Vida infinita, o lo que es lo mismo,  $10^6$  ciclos.
- Carga de amplitud constante completamente invertida ( $R = -1$ )

Es necesario definir la curva S-N de fatiga. Para ello, como se ha comentado anteriormente, hay tres opciones: que la curva esté incluida en la biblioteca de Solidworks, introducir los valores manualmente o derivarla del módulo elástico del material.

Se opta por la segunda, utilizando la siguiente gráfica:

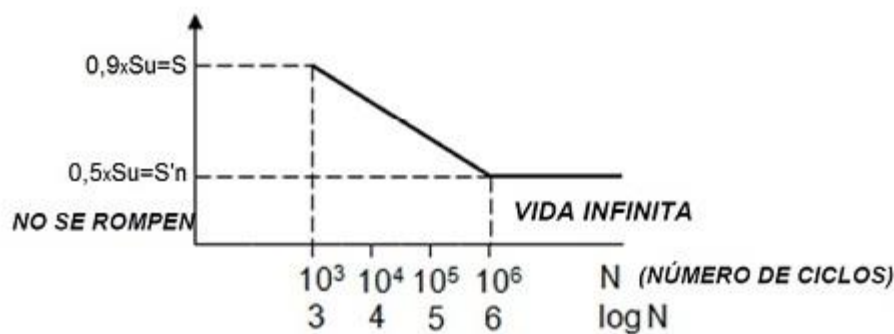


Ilustración 66 Diagrama S-N aceros

Mediante esta gráfica y conociendo la tensión última se hallan los puntos que definen la curva y se exportan a Solidworks. Se utiliza la forma de interpolación log-log:

Propiedades Tablas y curvas Curvas SN de fatiga Apariencia Rayado Personal

Origen  
Interpolador: Log-log  
Definir: Curva-0(R=-1)  
Derivar de módulo elástico del material:  
Basado en curvas de acero austenítico ASME  
Basado en curvas de acero al carbono ASME  
Definir la ecuación de fatiga S-N (para análisis de fatiga de vibración aleatorio)

Datos de tabla  
Factor de tensión (R): -1 Unidades: N/mm<sup>2</sup> (MPa)

Puntos	N	S
1	1000	651.44304
2	1000000	361.9128
3	1000000000	361.9128
4		

Vista preliminar

Ver todo

Archivo Ver Guardar

Ilustración 67 Introducción manual curva S-N acero aleado

El punto 1 para  $10^3$  ciclos tiene una tensión:

$$0,9 \cdot \sigma_{ut} = 0,9 \cdot 723,8 = 651,44 \text{ MPa}$$

Los puntos 2 y 3 de  $10^6$  y  $10^9$  ciclos respectivamente tienen una tensión:

$$0,5 \cdot \sigma_{ut} = 0,5 \cdot 723,8 = 361,91 \text{ MPa}$$

Haciendo clic en “Ver todo” se ve la curva de fatiga dibujada. Se puede guardar esta curva para otros casos en los que sea necesario mediante un archivo de datos.

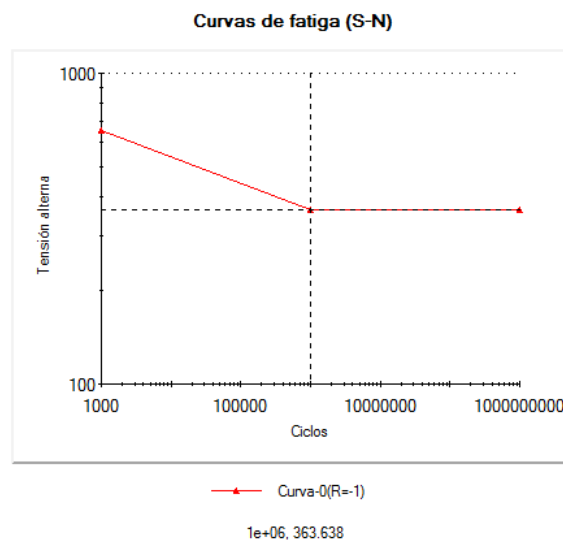


Ilustración 68 Curva S-N acero aleado

Por último se definen las propiedades del ensayo de fatiga.

Como solo hay un suceso no hay que hacer ninguna interacción. Para el cálculo de las tensiones alternas se usa la tensión equivalente de Von Mises. Además no hay que aplicar ninguna corrección de la tensión media ya que es nula.

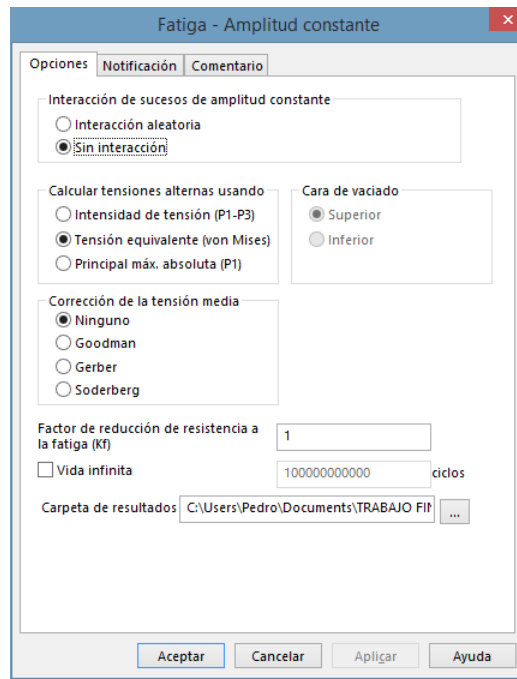


Ilustración 69 Propiedades del análisis de fatiga del acero aleado

Una vez definido todo el estudio se procede a ejecutarlo obteniendo los resultados que a continuación se exponen.

Los máximos valores de porcentaje de daño se producen en el eje que une biela y pedalier. Para la biela no se aprecia ningún punto con diferente color y el valor general es de un 0,1 % de daño.

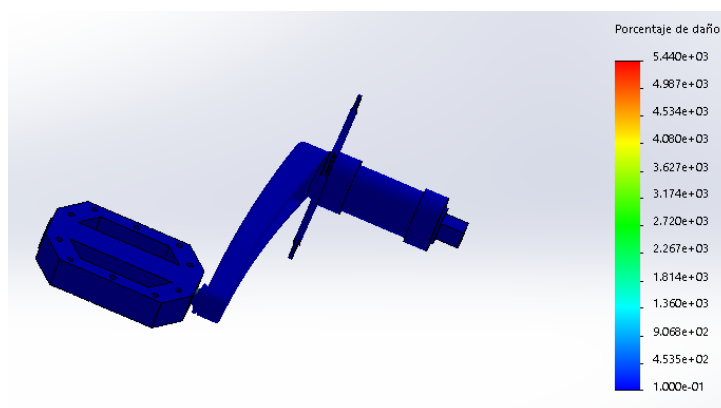


Ilustración 70 Porcentaje de daño biela acero aleado

En la gráfica de la vida total, como se ha mencionado antes, se han invertido los colores mostrando en color rojo la vida mínima y en azul la máxima.

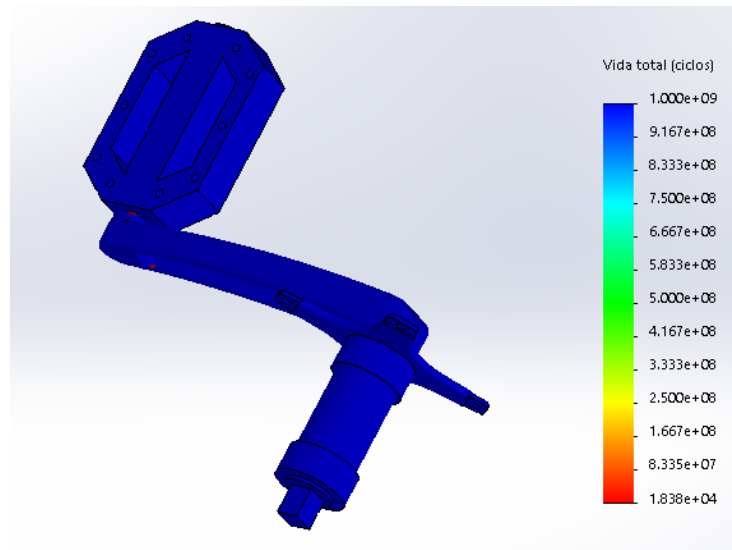


Ilustración 71 Vida total en ciclos del acero aleado

En la siguiente imagen ampliada se ha encontrado el valor mínimo de ciclos de vida para la biela de acero aleado. La vida mínima es de  $3,026 \cdot 10^5$  ciclos. Para el resto de la pieza, en azul, se superan los  $10^6$  ciclos siendo un caso de vida infinita.

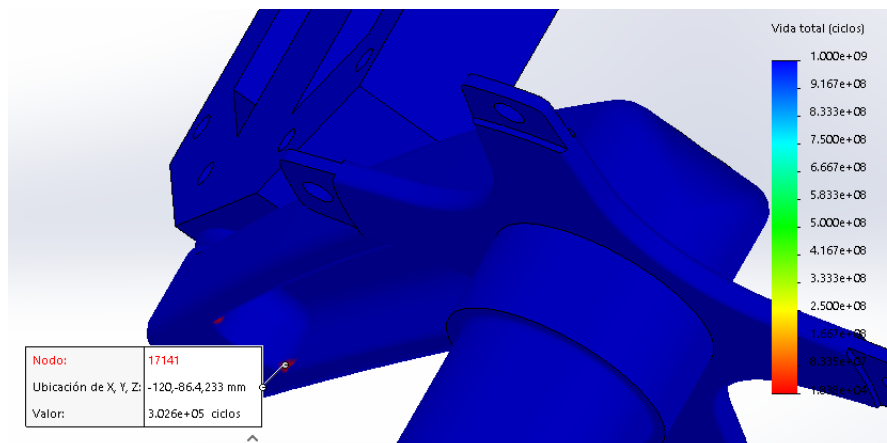


Ilustración 72 Puntos mínima vida biela de bicicleta de acero aleado

## 5.2 Estudio 2. Biela de aluminio 7075-T6

En este segundo caso el conjunto de biela, eje pedalier y pedal son de aluminio de la serie 7000, en concreto el aluminio 7075-T6. Como se ha comentado anteriormente es el material más utilizado en la industria ciclista, tanto para fabricación de cuadros como para componentes.

### 5.2.1 Análisis estático

Mediante la siguiente imagen se muestran las propiedades mecánicas que recoge Solidworks en su biblioteca de materiales para el aluminio 7075-T6.

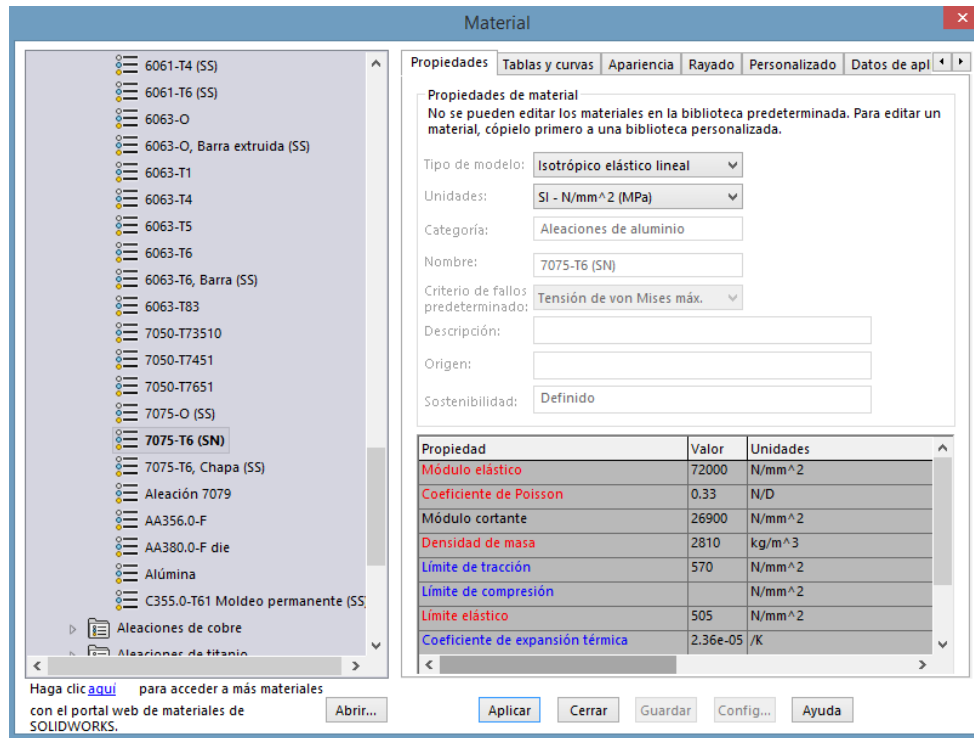


Ilustración 73 Propiedades del aluminio 7075-T6

Entre ellas cabe destacar la tensión última a tracción y la tensión de fluencia:

$$\sigma_{ut} = 570 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yt} = 505 \text{ MPa}$$

Su densidad de masa, sabiendo que es un material más ligero que el acero, tiene un valor de  $\rho = 2810 \text{ kg/m}^3$ .

Igual que antes se disponen las fuerzas y sujeciones que se aplican en el conjunto. Se puede observar esta configuración en la siguiente imagen:

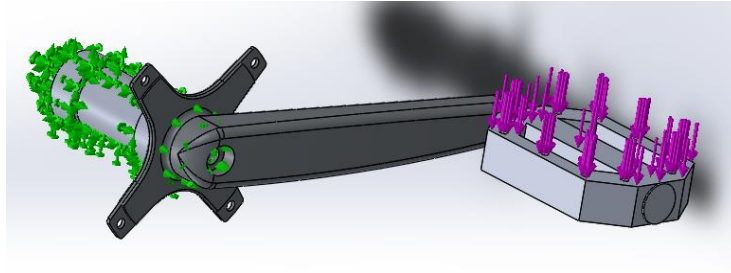


Ilustración 74 Fuerzas y sujeciones en la biela de aluminio 7075-T6

Con las condiciones ya definidas se procede a resolver el análisis, arrojando los siguientes resultados:

### Tensión de Von Mises

En este caso los valores máximos tampoco superan el límite elástico del material.

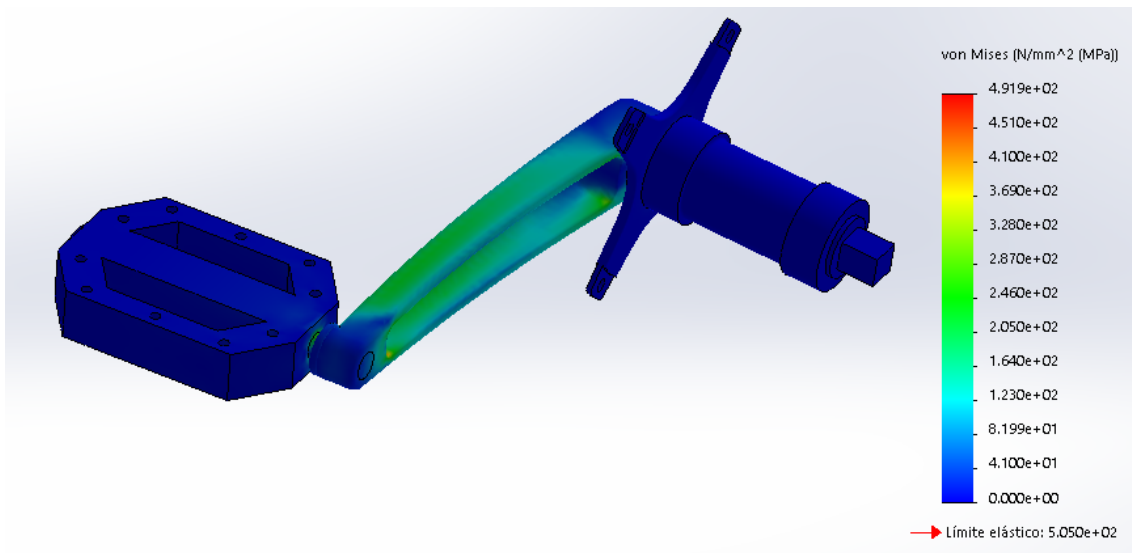


Ilustración 75 Tensiones aluminio 7075-T6

Al igual que en con la biela de acero la zona intermedia sufre mayores tensiones, concretamente en la zona donde se ha rebajado el material.

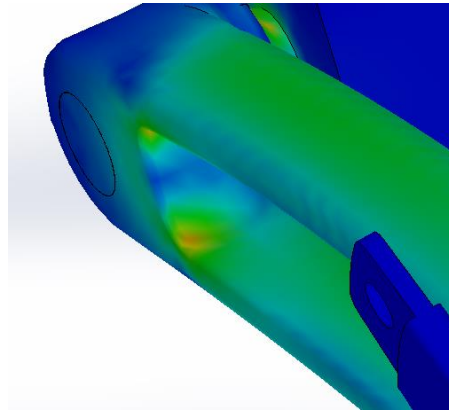


Ilustración 76 Puntos concentración tensiones en biela y pedal de aluminio

Identificando los máximos valores de tensión en los puntos de concentración de tensiones:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 4,065 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

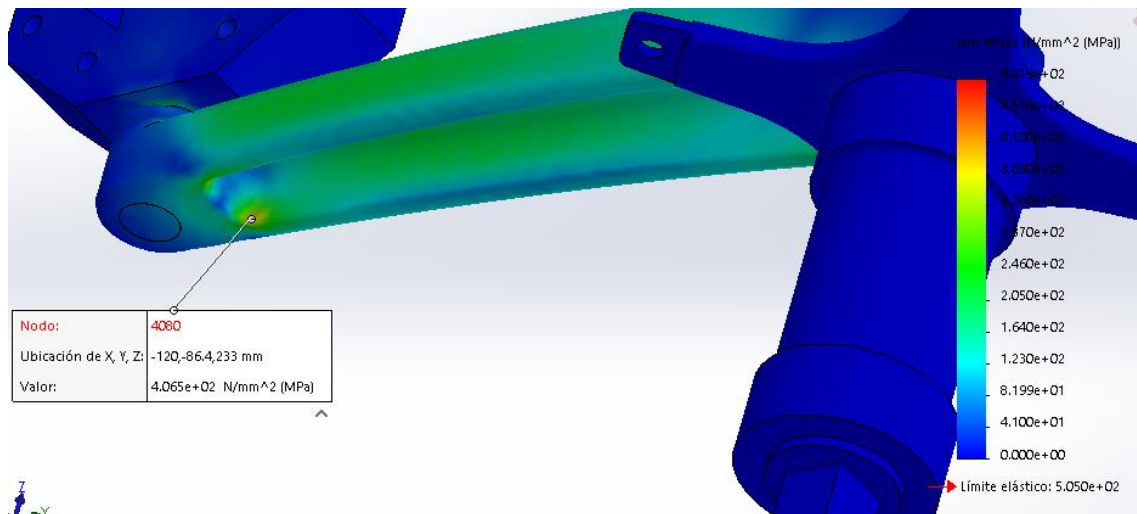


Ilustración 77 Máxima tensión Von Mises en la biela de aluminio 7075-T6



## Deformaciones unitarias

El trazado de la deformación unitaria para el aluminio 7075-T6 quedaría de la siguiente forma:

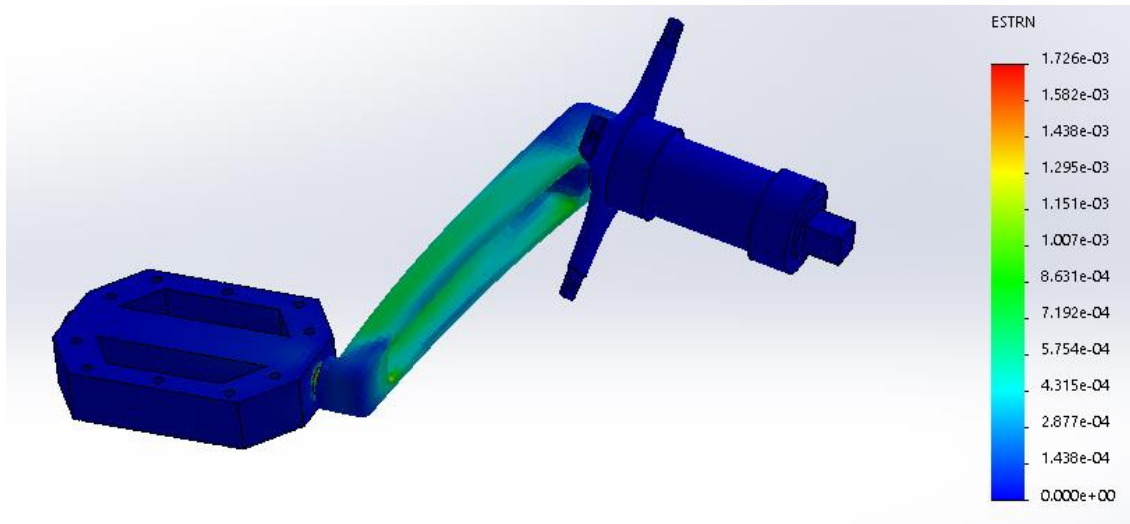


Ilustración 78 Deformaciones en la biela de aluminio 7075-T6

Encontrando el máximo valor de deformación unitaria de la biela en la misma región de la máxima tensión de Von Mises. Su valor es de  $3,31 \cdot 10^{-3}$  en el elemento 2612.

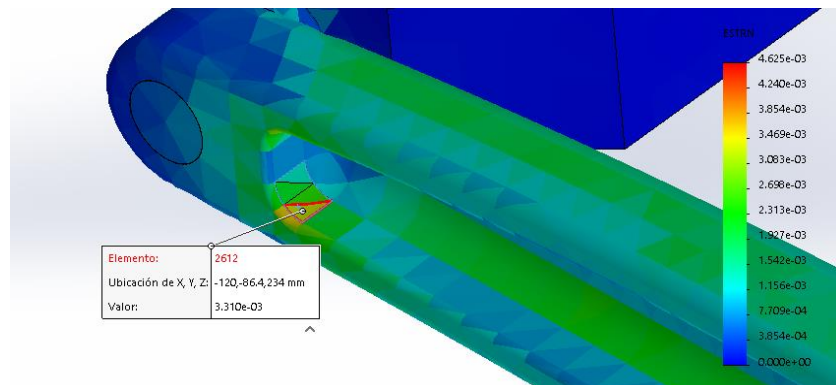


Ilustración 79 Máxima deformación unitaria en la biela de aluminio 7075-T6

### 5.2.2 Análisis de fatiga

Se comienza cargando el mismo suceso que para el acero aleado.

Para definir la curva S-N de fatiga se utiliza la biblioteca de Solidworks.

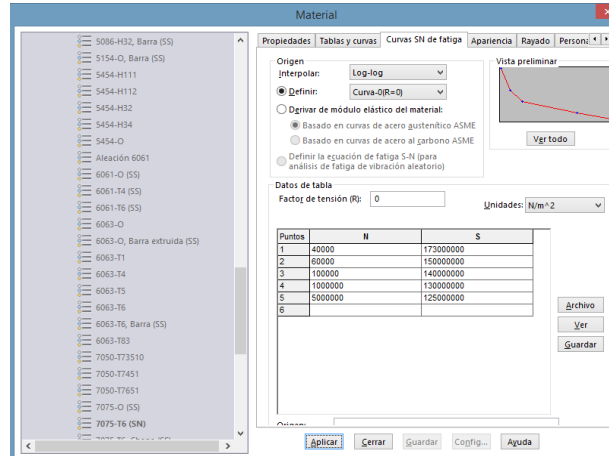


Ilustración 80 Introducción de la curva S-N aluminio con la biblioteca

Una vista más en detalle de la curva S-N:

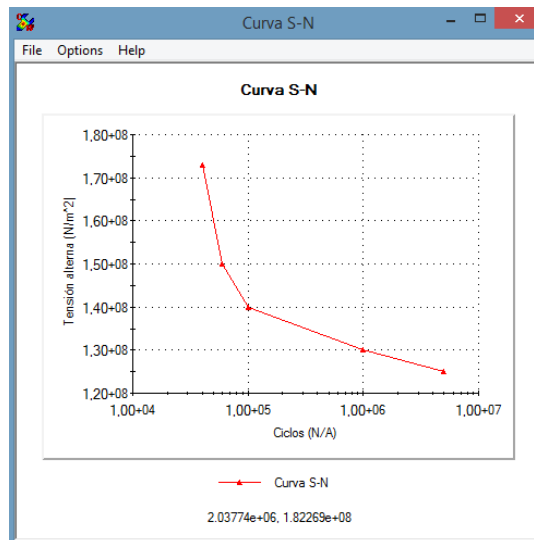


Ilustración 81 Diagrama S-N aluminio 7075-T6

Se definen las propiedades del ensayo de fatiga.

Como solo hay un suceso no hay que hacer ninguna interacción. Para el cálculo de las tensiones alternas se usa la tensión equivalente de Von Mises.

Además no hay que aplicar ninguna corrección de la tensión media ya que es nula.

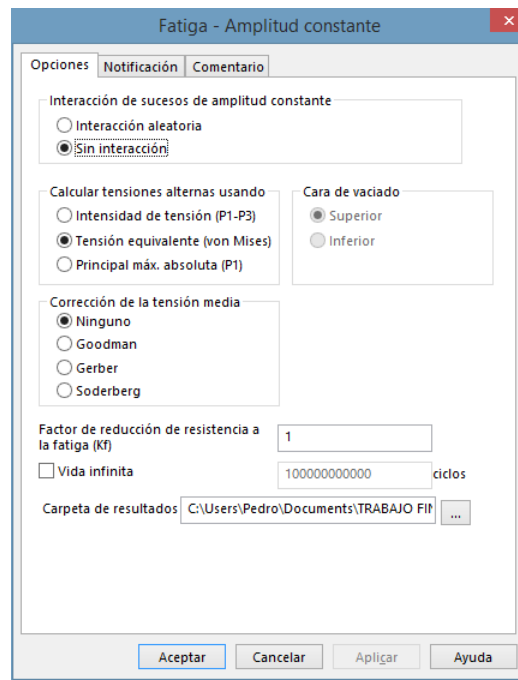


Ilustración 82 Propiedades del análisis de fatiga del aluminio 7075-T6

Tras ejecutarlo se obtienen los siguientes resultados:

Los máximos valores de porcentaje de daño se producen en el eje que une biela y pedalier. En la biela la zona intermedia ronda entre los  $2$  y  $2,5 \cdot 10^3$  % de la vida para el suceso asignado.

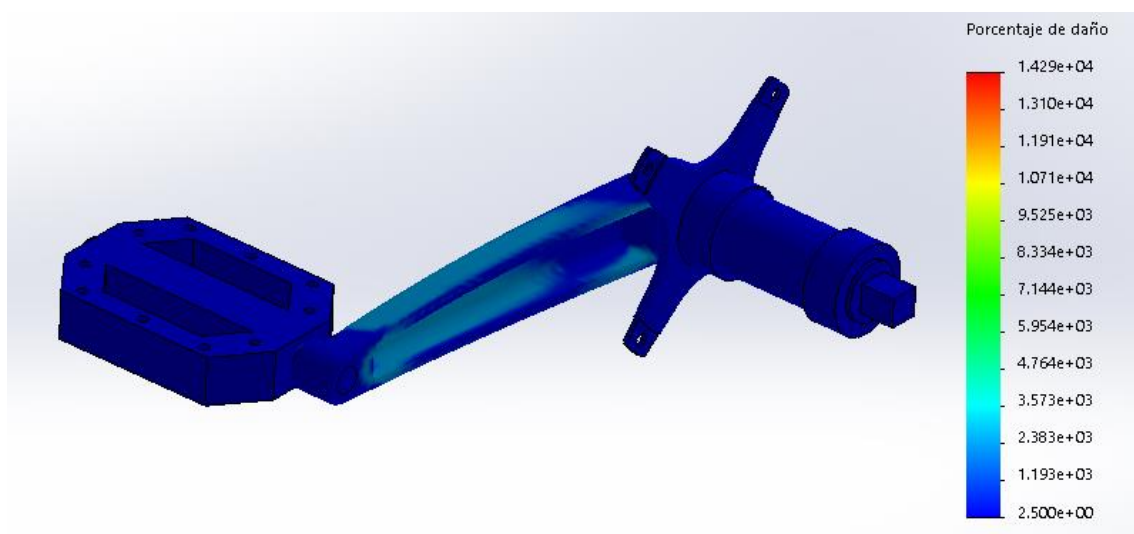


Ilustración 83 Porcentaje de daño biela aluminio 7075-T6

En la gráfica de la vida total se han invertido los colores mostrando en color rojo la vida mínima y en azul la máxima.

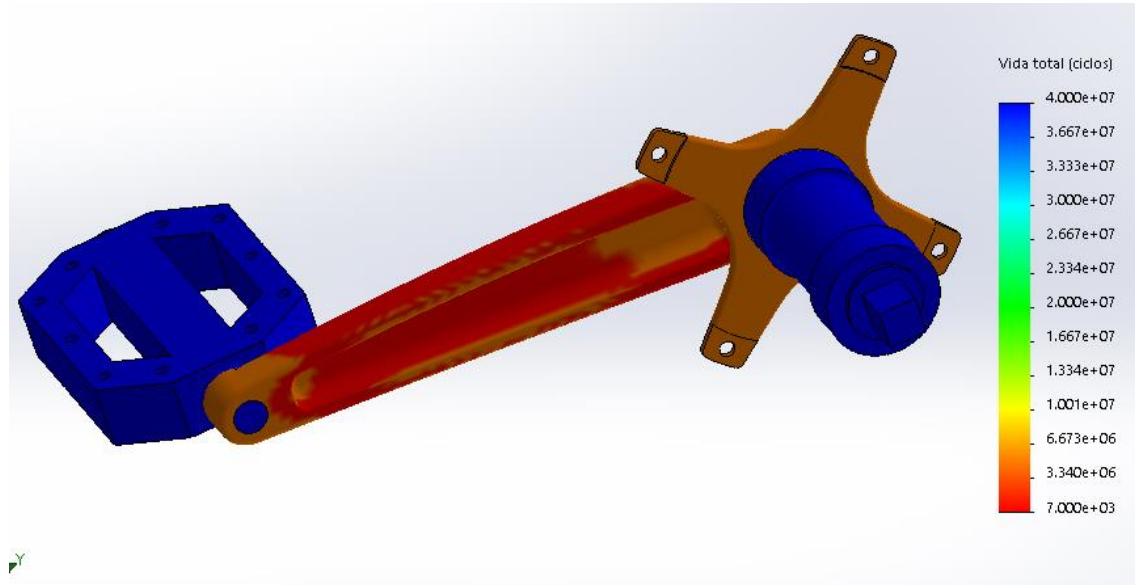


Ilustración 84 Vida total en ciclos del aluminio 7075-T6

Como se aprecia la vida de la biela de aluminio es bastante menor que en el caso del acero. La zona crítica de la biela, coloreada en rojo, tiene una vida de 40 000 ciclos.

Se observan con más detalle en la siguiente captura:

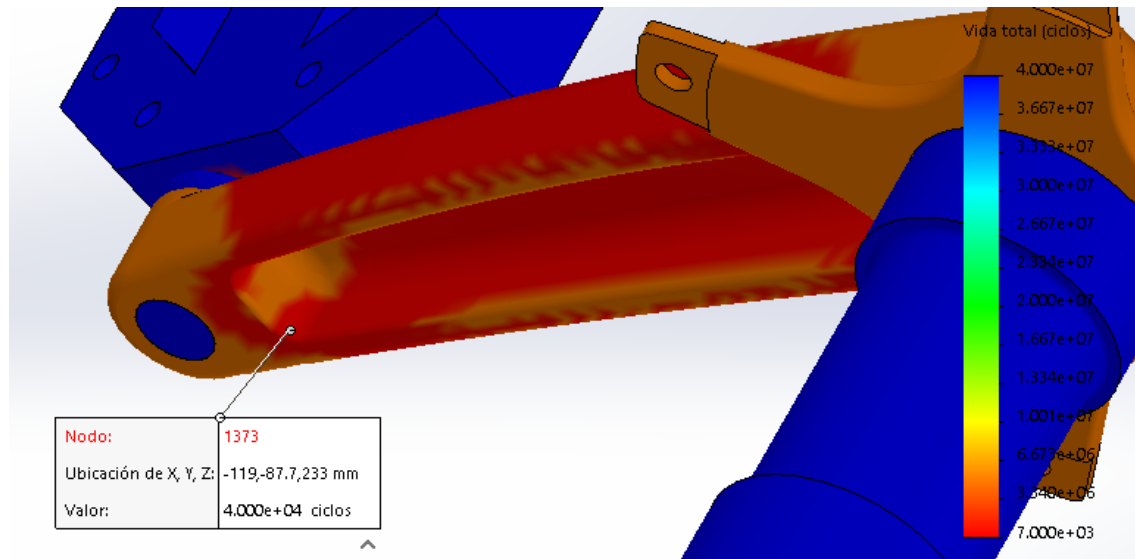


Ilustración 85 Puntos mínima vida biela de bicicleta aluminio 7075-T6

### 5.3 Estudio 3. Biela de titanio Ti-6Al-4V

Este último caso práctico se ensaya con un conjunto de biela, eje pedalier y pedal de titanio aleado Ti-6Al-4V.

#### 5.3.1 Análisis estático

Mediante la siguiente imagen se muestran las propiedades mecánicas que recoge Solidworks en su biblioteca de materiales titanio Ti-6Al-4V.

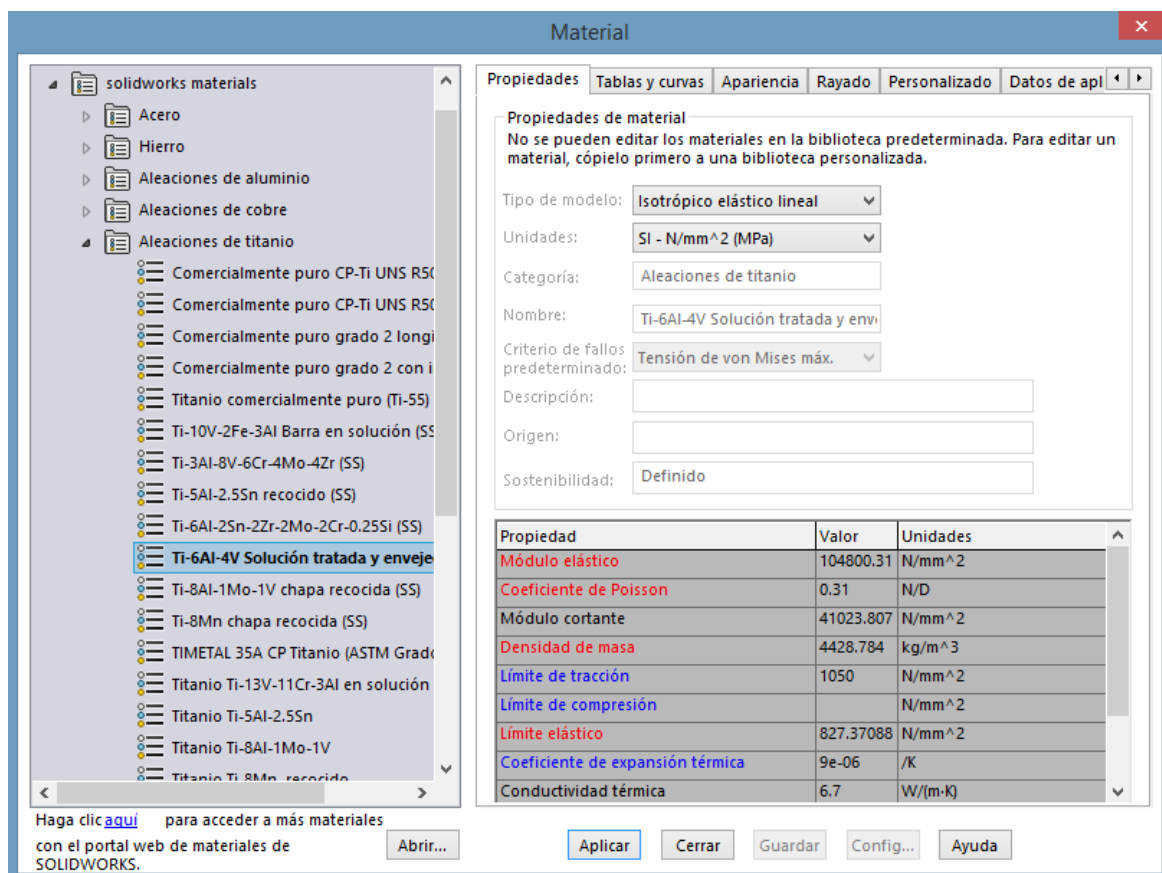


Ilustración 86 Propiedades del Titanio Ti-6Al-4V

Entre ellas destacan la tensión última a tracción y la tensión de fluencia:

$$\sigma_{ut} = 1050 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yt} = 827,37 \text{ MPa}$$

Su densidad de masa es  $\rho = 4428,784 \text{ kg/m}^3$ .

Con la misma configuración de fuerzas y sujeciones que anteriormente:

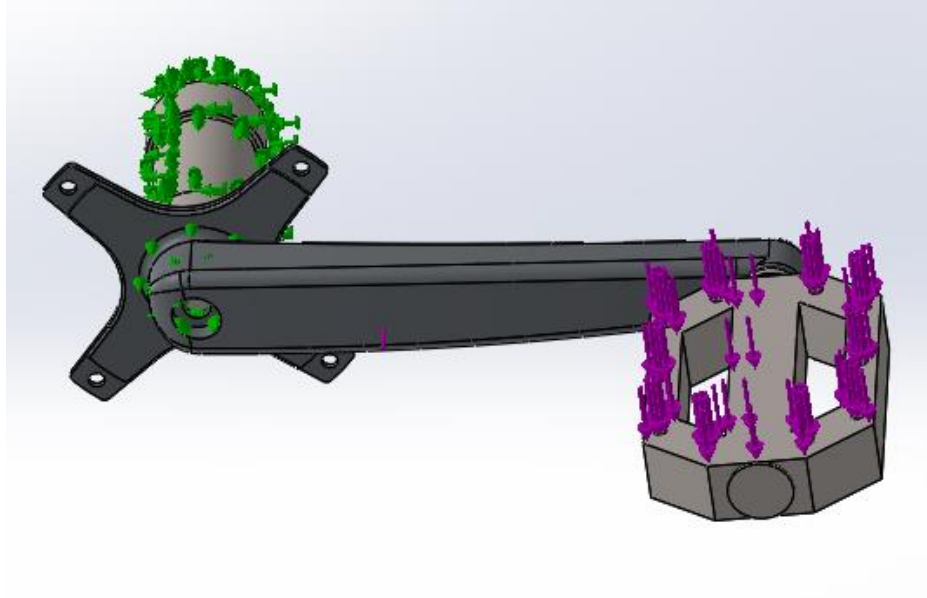


Ilustración 87 Fuerzas y sujeciones en la biela de titanio Ti-6Al-4V

Tras ejecutar los análisis los resultados son los siguientes:

### Tensión de Von Mises

Los valores máximos no se acercan mucho al límite elástico del material.

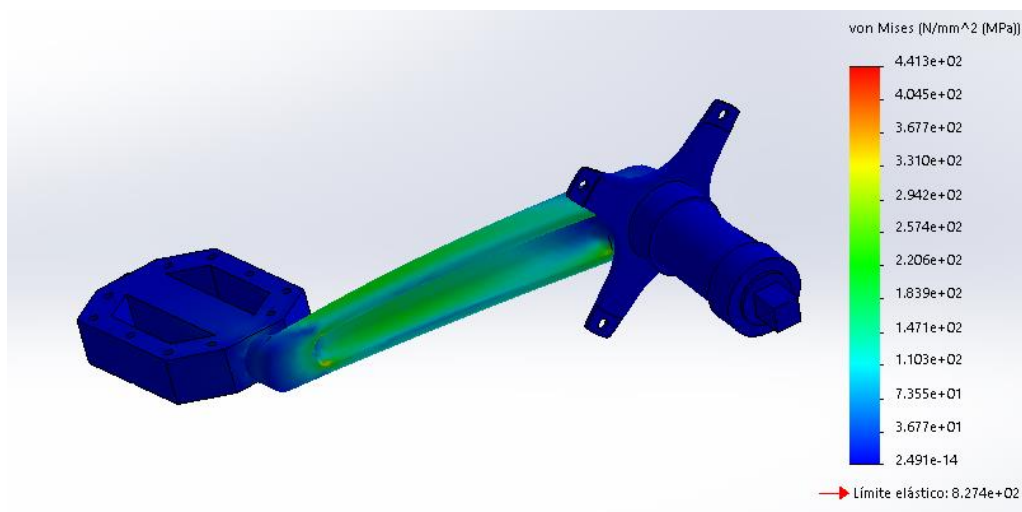


Ilustración 88 Tensiones titanio Ti-6Al-4V

Como en los anteriores supuestos la zona intermedia de la biela sufre mayores tensiones, concretamente en la zona donde se ha rebajado el material.

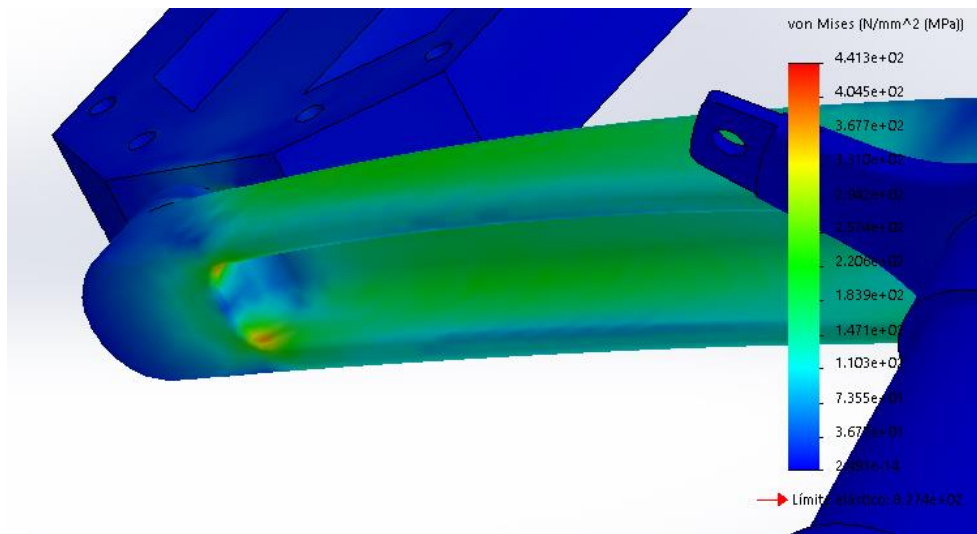


Ilustración 89 Puntos concentración de tensiones en biela y pedal de titanio

El valor máximo de tensión en la biela está en el nodo 3106.

$$\sigma_{\max} = 3,829 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

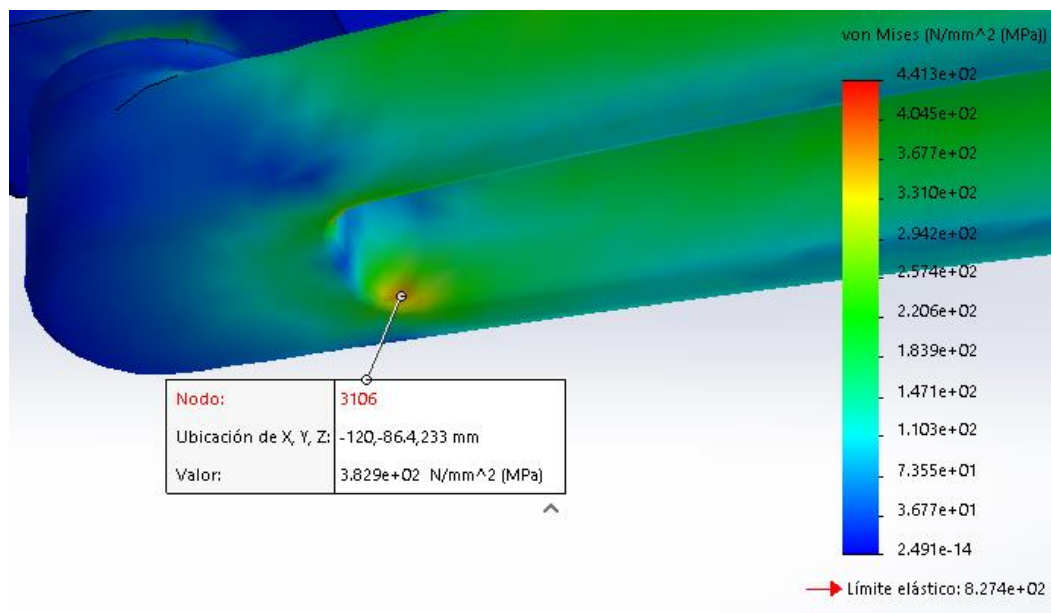


Ilustración 90 Máxima tensión Von Mises en la biela de titanio Ti-6Al-4V



### Deformaciones unitarias

El mapa de la deformación unitaria para el titanio Ti-6Al-4V quedaría de la siguiente forma:

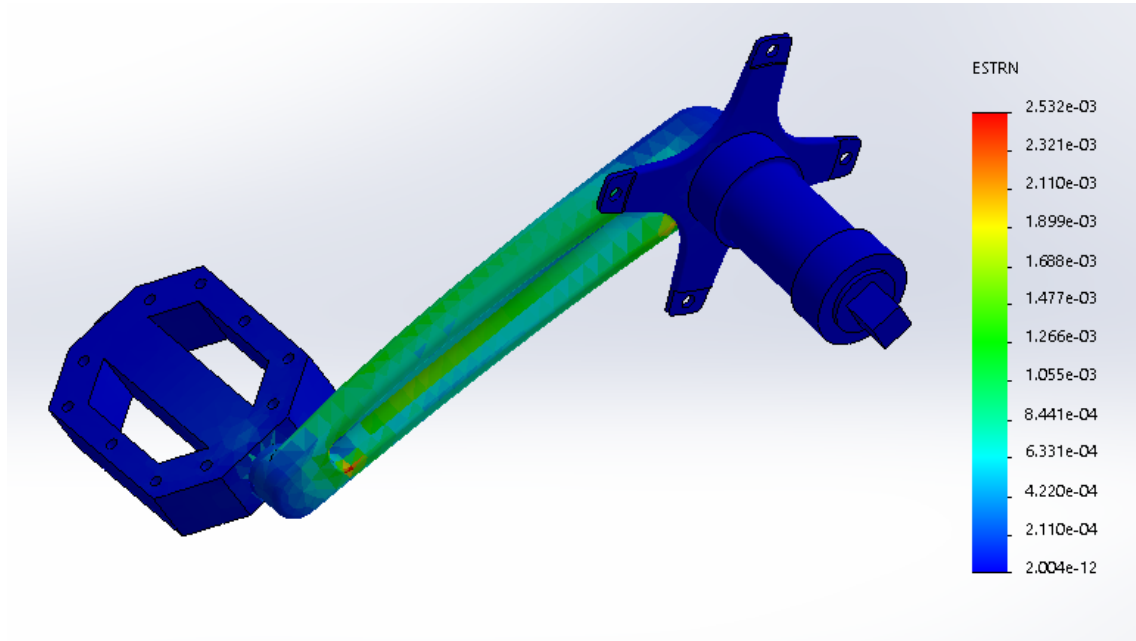


Ilustración 91 Deformaciones en la biela de titanio Ti-6Al-4V

El máximo valor de deformación unitaria de la biela está en la misma región de la máxima tensión de Von Mises. Su valor es de  $2,499 \cdot 10^{-3}$  en el elemento 1797.

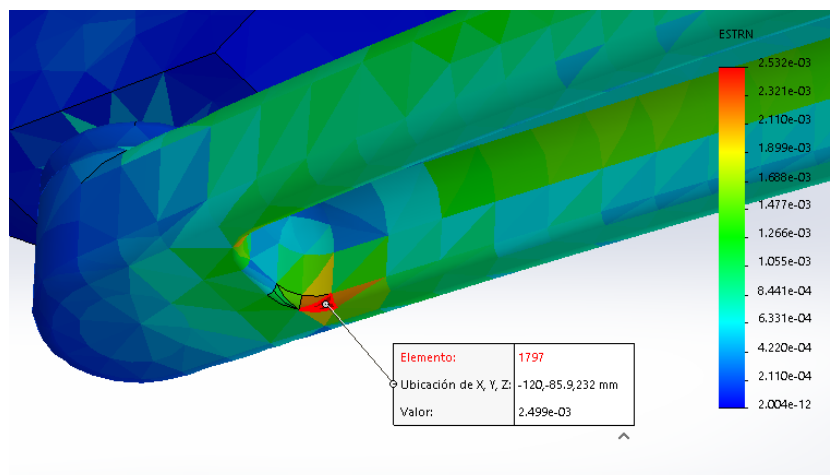


Ilustración 92 Máxima deformación unitaria en la biela de titanio Ti-6Al-4V



### 5.3.2 Análisis de fatiga

Se comienza cargando el mismo suceso que para los anteriores materiales.

Para definir la curva S-N de fatiga se utiliza la biblioteca de Solidworks.

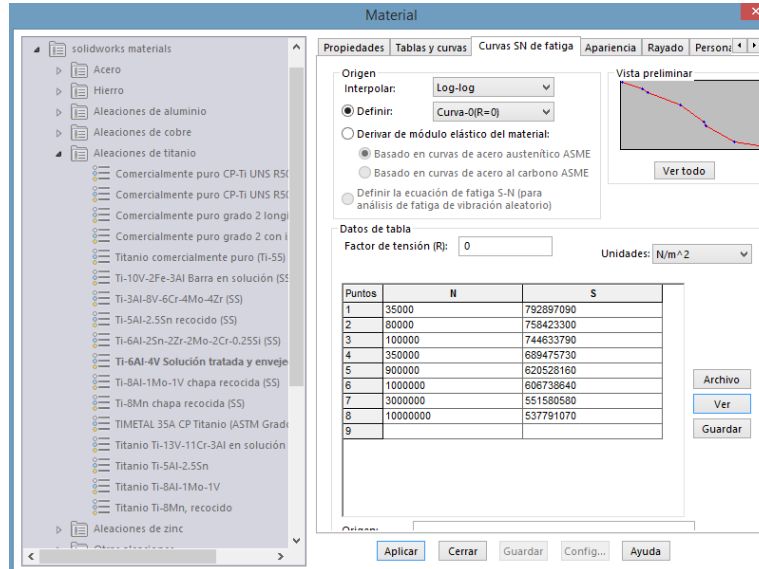


Ilustración 93 Introducción de la curva S-N titanio con la biblioteca

La vista con más detalle de la curva S-N:

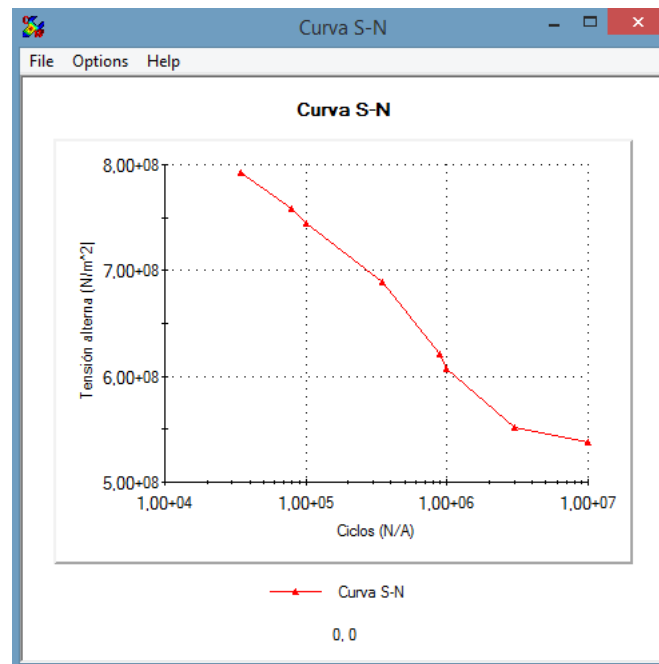
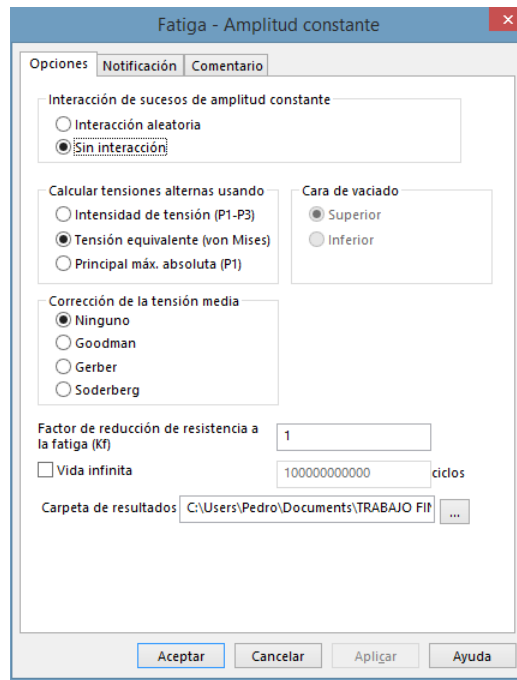


Ilustración 94 Diagrama S-N titanio Ti-6Al-4V

Se definen las propiedades del ensayo de fatiga.

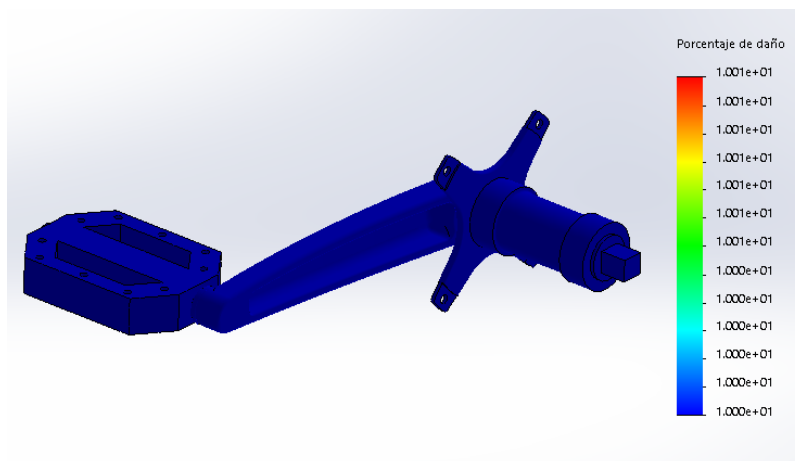
Como en los dos casos anteriores solo hay un suceso, así que no hay que hacer ninguna interacción. Para el cálculo de las tensiones alternas se usa la tensión equivalente de Von Mises. Además no hay que aplicar ninguna corrección de la tensión media ya que es nula.



*Ilustración 95 Propiedades del análisis de fatiga del titanio Ti-6Al-4V*

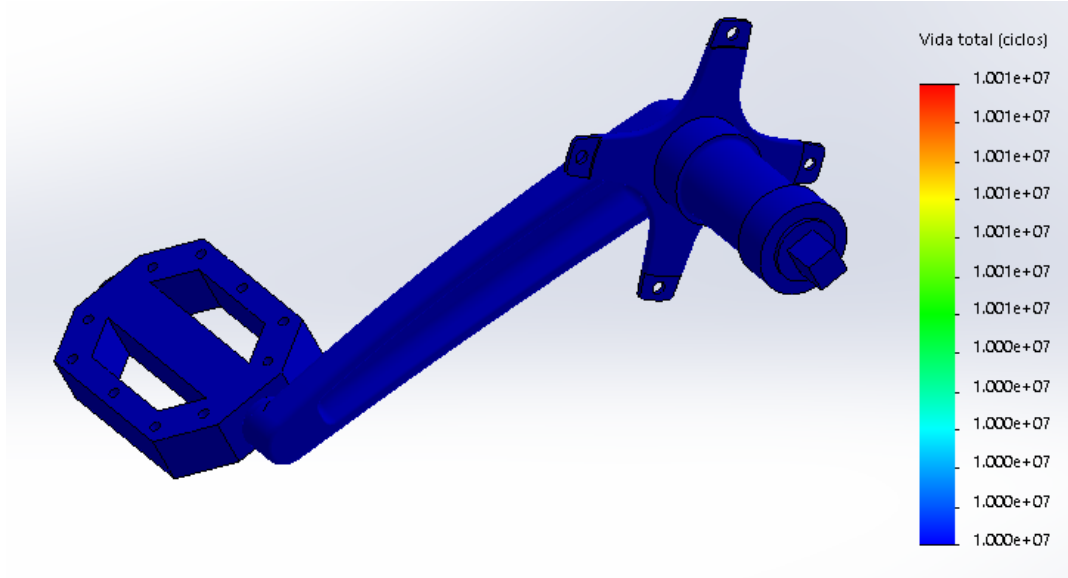
Se ejecuta y se obtienen los siguientes resultados:

Como se ve a simple vista el conjunto apenas ha sufrido daño. Ya se había comentado que el titanio es un material que aguanta perfectamente el paso del tiempo y en esta gráfica se demuestra.



*Ilustración 96 Porcentaje de daño biela titanio Ti-6Al-4V*

En la gráfica de la vida total no se aprecia ningún color que resalte con el azul.



*Ilustración 97 Vida total en ciclos del titanio Ti-6Al-4V*

Como se aprecia la vida de la biela del titanio es prácticamente infinita. Ni siquiera se aprecian las zonas críticas que aparecen en el estudio estático.

## 5.4 Comparativa de resultados

Material	$\sigma_{ut}$ (MPa)	$\sigma_{yt}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deformación unitaria	Daño máx (%)	Vida mínima (ciclos)
Acero aleado	723,83	620,42	7700	$4,007 \cdot 10^2$	$1,240 \cdot 10^{-3}$	0,1	$3,026 \cdot 10^5$
Aluminio 7075-T6	570	505	2810	$4,065 \cdot 10^2$	$3,310 \cdot 10^{-3}$	(2-2,5) $\cdot 10^3$	40 000
Titanio Ti-6Al-4V	1050	827,37	4428,784	$3,829 \cdot 10^2$	$2,499 \cdot 10^{-3}$	Nulo	Infinita

Tabla 5 Comparativa resultados estudio estático y de fatiga

Como ya se sabe por la teoría que se ha expuesto anteriormente sobre los tres materiales del ensayo, el aluminio tiene los menores valores de tensión última a tracción y límite de fluencia. El titanio ostenta los mayores valores en este ámbito.

En cambio, cuando se trata de ligereza el aluminio 7075-T6 es el líder indiscutible, seguido por el titanio Ti-6Al-4V. Aunque en este apartado el acero aleado se queda atrás hay que tener en cuenta que tanto la biela de aluminio como la de titanio han de tener que engrosarse para conseguir la rigidez del acero.

Los resultados arrojan una práctica igualdad en las tensiones máximas de Von Mises. En cuanto a la deformación unitaria el mayor valor será para el aluminio, seguido del titanio. Como se preveía el acero aleado lidera este apartado teniendo la menor deformación unitaria, lo que le convierte en el más rígido. Hay que recordar que cuanto mayor rigidez haya en la biela, mejor eficiencia en la pedalada se obtendrá.

El daño máximo en el acero aleado y en el titanio Ti-6Al-4V es prácticamente nulo, ni siquiera se aprecia en las gráficas. En cambio en el aluminio 7075-T6 supera el 100% lo que indica que se ha producido el fallo.

Esto se ve más claro con la vida mínima obtenida en la biela. En los casos del acero y el titanio se aprecia su gran resistencia a la fatiga, obteniendo una vida prácticamente infinita. Diferente es el caso del aluminio que aguanta hasta los 40 000 ciclos antes del fallo.

En definitiva cada material tiene sus pros y sus contras. El criterio de selección puede variar según los costes de cada material, las necesidades o condiciones de contorno en las que va a trabajar, las dificultades para su fabricación... Todos estos factores pueden hacer que se decante por uno o por otro.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar de que se ha estudiado el fenómeno de fatiga durante años, este sigue generando cierto grado de incertidumbre. Los resultados de los ensayos basados en el MEF se aproximan a la realidad pero no son exactos, debido a otros muchos factores que pueden influir en un sistema con condiciones de servicio. Por tanto el estudio mediante MEF no es suficiente para asegurar el buen comportamiento a fatiga de un producto, sino que habría que complementarlo con ensayos sobre los prototipos.

Aun así, el estudio con programas de simulación ahorra mucho tiempo y costes en el proceso de diseño y fabricación de un producto acercándolo a la fase final de prototipado.

Con SOLIDWORKS Simulation se puede valorar el rendimiento de un modelo, sometido a diferentes condiciones de contorno, de una forma rápida y sencilla. Al ser Simulation un módulo que está integrado en el propio programa resulta más cómodo de manejar ya que no hay que importar la pieza de un programa de CAD a uno de CAE, como por ejemplo ocurre con ANSYS Workbench.

Otra de las ventajas es que a diferencia del método de resolución analítico, en Simulation se pueden modificar las condiciones de contorno y los criterios de una manera más dinámica.

En cuanto a la comparación de las propiedades mecánicas de cada material, los resultados reflejan lo que ya adelantaba la teoría. El aluminio es el más ligero aunque también el menos rígido y el que peor se comporta a fatiga. El acero ofrece unos buenos resultados en todos los ámbitos siendo muy regular. El titanio destaca por su gran durabilidad. Aun conociendo estos datos, cabe destacar que no se ha elegido un material de los ensayados como ganador porque para ello hay otras variables sobre las que profundizar, como por ejemplo: el coste del propio material o las condiciones de servicio de la biela de la bicicleta. Este puede ser otro hilo sobre el que tirar en un futuro.

Habiendo aprendido a utilizar SOLIDWORKS y sobre todo su módulo Simulation, un posible desarrollo futuro sería utilizar la fibra de carbono como material para la biela de bicicleta ya que tiene unas magníficas propiedades mecánicas. Al principio, era uno de los materiales que se iban a ensayar pero debido a su complejidad se descartó, ya que sólo con él daba para un trabajo entero. Y es que la fibra de carbono no tiene un comportamiento isotrópico y por tanto cualidades como: elasticidad, temperatura, conductividad...varían según la disposición de las fibras.

Además el modelo de la biela no tiene por qué ser un modelo final. Es necesario probar su comportamiento con ligeras modificaciones en la geometría para optimizar su desarrollo. Incluso se le podría incluir alguna nueva pieza, como puede ser un potenciómetro, el cual iría integrado en la propia biela.

También sería interesante realizar los ensayos incluidos en la normativa, primero, virtualmente, con un programa de simulación y posteriormente en un laboratorio. Con los resultados obtenidos se podría valorar el grado de aproximación de los modelos virtuales a los reales.

## LISTA DE REFERENCIAS

### Páginas web

Historia de la bicicleta

1. <http://www.terra.org/categorias/articulos/breve-historia-de-la-bicicleta>

Biomecánica del ciclismo

2. <https://www.emeb.es/bielas-tipos-y-medidas/>
3. <https://q-se.com/relacion-entre-variables-fisiologicas-y-biomecanicas-y-la-produccion-de-potencia-aerobica-en-ciclismo-1817-sa-z57cfb2725357d>
4. <https://www.ciclismoafondo.es/>
5. <https://esmtb.com/>

Bielas grandes marcas

6. <http://rotorbike.com/es/aldhu-3d/>
7. <https://www.fullspeedahead.com/en/technology>
8. <https://bike.shimano.com/es-ES/home.html>

Patentes

9. <https://patents.google.com>
10. <https://worldwide.espacenet.com/>

### Libros

11. Carles Riba Romeva, *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. 2008
12. Rafael Avilés. *Análisis de Fatiga en Máquinas*. Editorial Paraninfo 2005.
13. Documentación de la asignatura Cálculo y Diseño Avanzado de Máquinas. 3º de Ingeniería Mecánica.
14. Rodrigo R. Bini. *Biomechanics of Cycling*. 2014.

### Manuales

15. Ayuda de SOLIDWORKS 2018

### Trabajos Fin de Grado

16. David Jaramillo Martínez. *Análisis de fatiga mediante el Método de los Elementos Finitos*. 2016.

17. Francisco Javier Gesé Bordils. *Estudio mediante elementos finitos de los esfuerzos producidos en una biela de bicicleta*. 2013.
18. Eva Marco Esteban. *Metodología para el análisis a fatiga mediante el código pro engineer: aplicación a un eje ferroviario*. 2010.

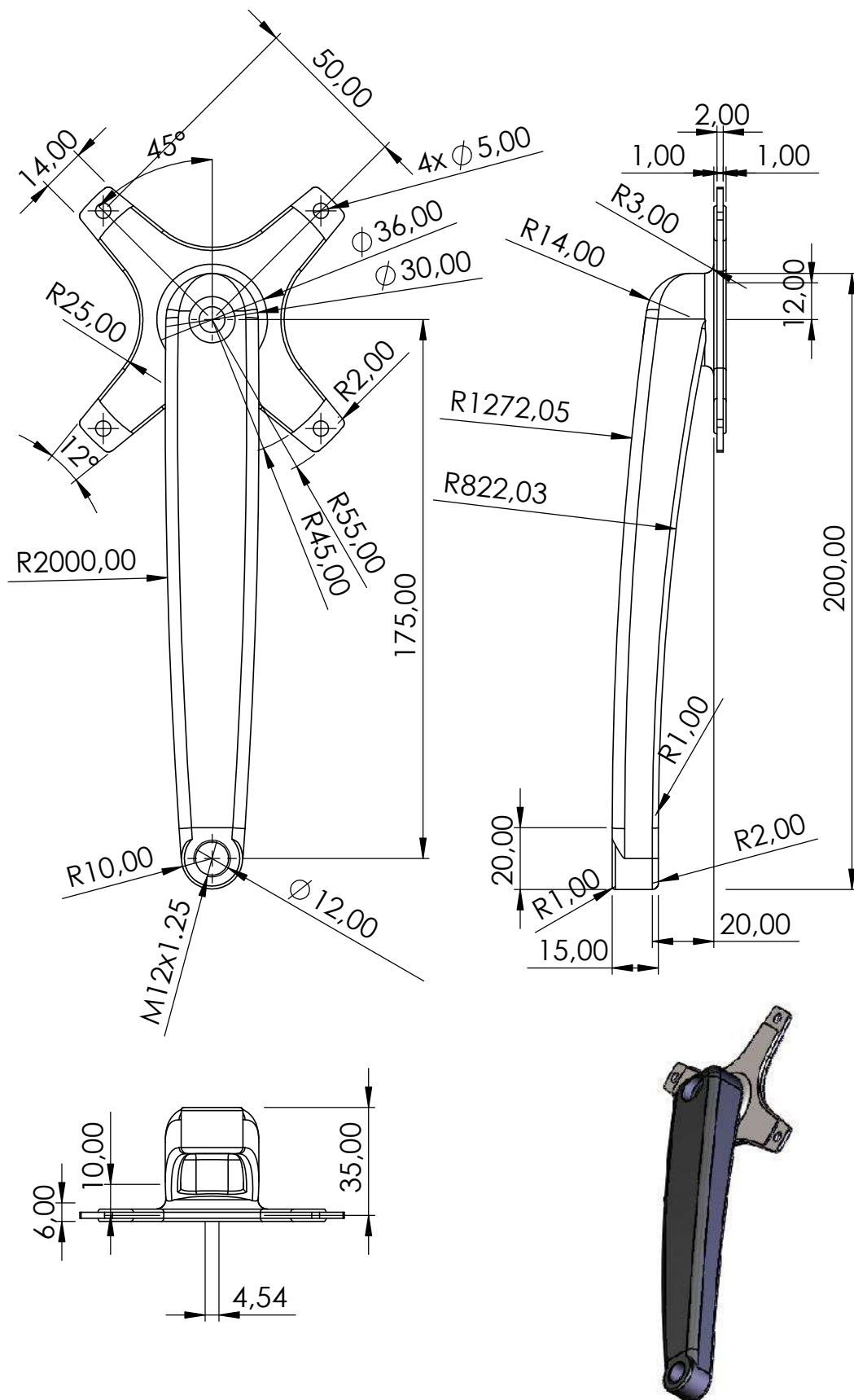


## ANEXO A

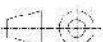
### A.1 Plano de la biela en SOLIDWORKS

### A.2 Plano del eje de pedalier en SOLIDWORKS

### A.3 Plano del pedal en SOLIDWORKS



Escala 1:2

Proyección: 

Título: **Biela de bicicleta**

Fecha: 29/08/2018

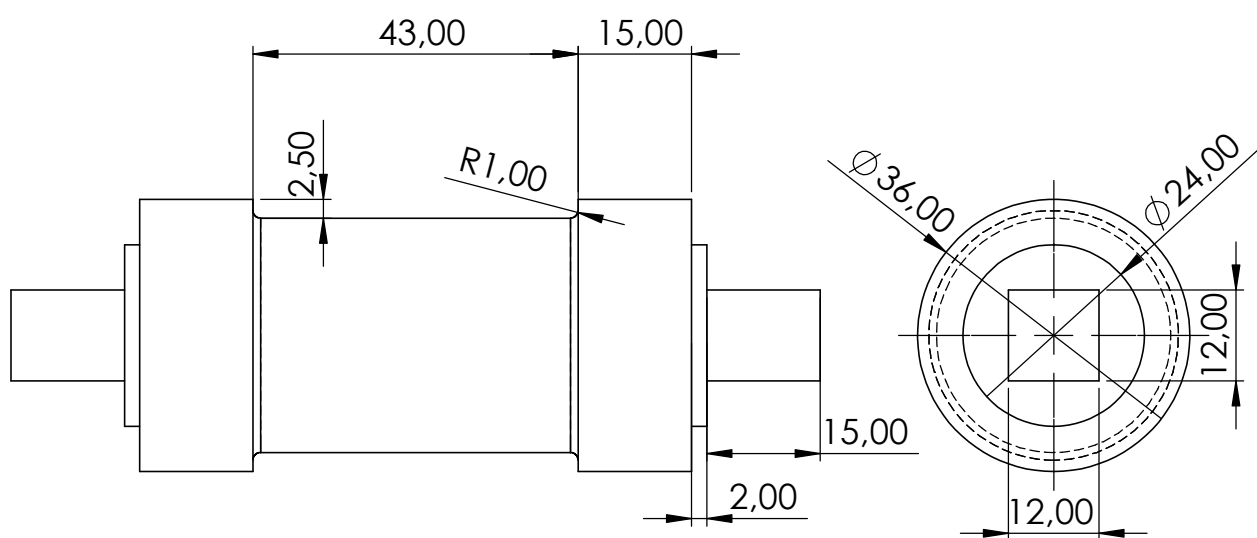
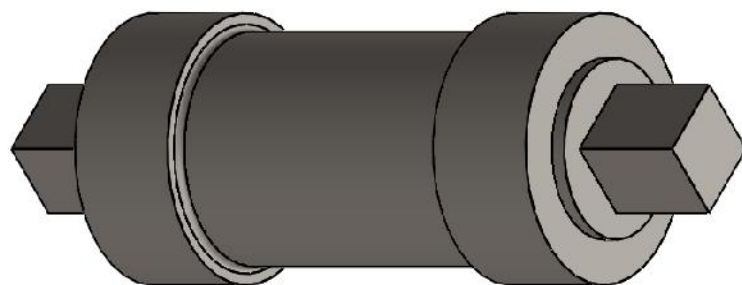


Universidad de La Rioja

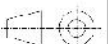
Nombre y Apellidos: **Pedro Rodríguez Sánchez**

Especialidad: **Ingeniería Mecánica**

Nº de lámina: **1**



Escala 1:2

Proyección: 

Título: *Eje pedalier bicicleta*

Fecha: 29/08/2018

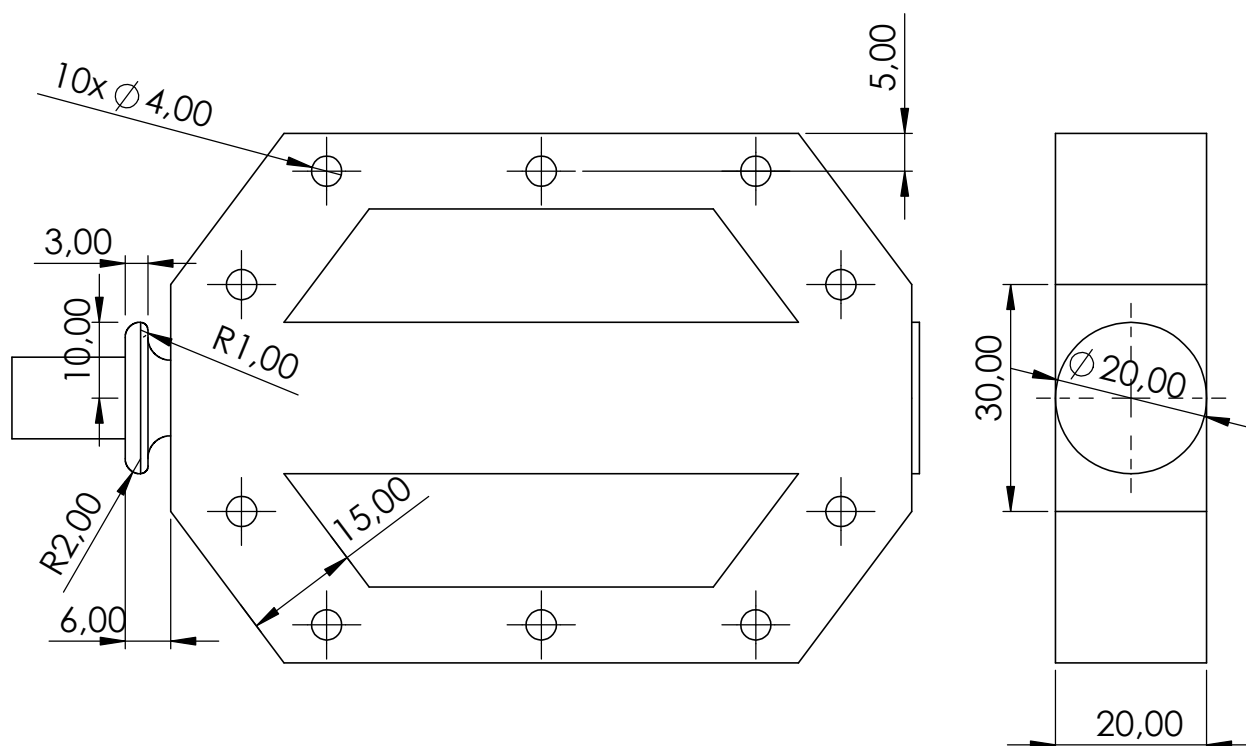
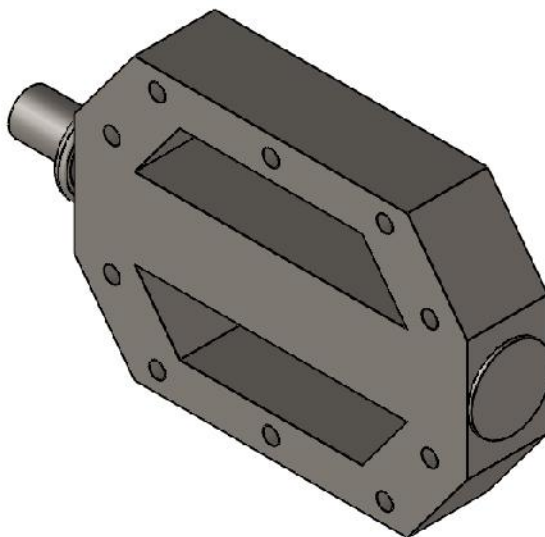


Universidad de La Rioja

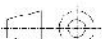
Nombre y Apellidos: *Pedro Rodríguez Sánchez*

Especialidad: *Ingeniería Mecánica*

Nº de lámina: 2



Escala 1:1

Proyección: 

Título: *Pedal bicicleta*

Fecha: 29/08/2018



Universidad de La Rioja

Nombre y Apellidos: *Pedro Rodríguez Sánchez*

Especialidad: *Ingeniería Mecánica*

Nº de lámina: 3